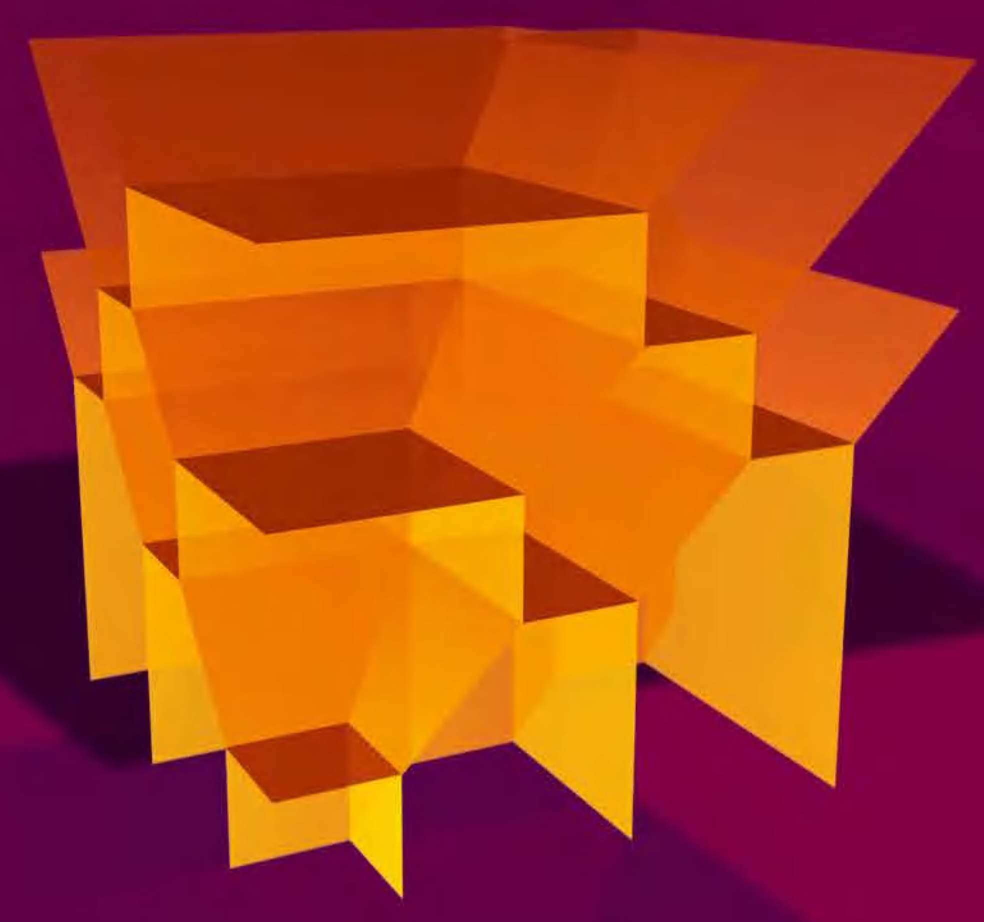
www.Spektrum.de 6.19

6.19

Spektrum der Wissenschaft

Exotische neue Mathematik

Der Siegeszug der tropischen Geometrie



8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



RAUMFAHRT Der Weg zur Mondstation

KLIMA Antarktische Gletscher vor dem Kollaps

ANTHROPOLOGIE Die Erfindung des Kriegs



EDITORIAL
INS HEFT HÖREN

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Vor vier Monaten fragte ich an dieser Stelle, wer Lust auf einen **Spektrum**-Podcast habe. Wir erhielten etliche positive Rückmeldungen und haben die damals noch vage Idee tatsächlich in die Tat umgesetzt. Danke für Ihr Interesse! Eine Leserin schrieb mir, sie würde einen Podcast aus der Redaktion garantiert zusammen mit Freunden anhören. Ob gemeinsam mit anderen oder aber allein – auf dem Weg zur Arbeit, beim Kochen oder in welcher Situation auch immer Sie uns Ihr Ohr leihen mögen: Die ersten Stücke des Podcasts sind inzwischen produziert, und zu jeder neuen Ausgabe von **Spektrum** kommt ab sofort eine weitere Folge heraus. Rund eine Dreiviertelstunde lang berichten wir darin über Forschung, die uns Redakteure umtreibt, und plaudern ein wenig aus dem Nähkästchen. Konkret sprechen wir stets über drei ausgewählte Themen der druckfrischen Ausgabe – wobei das Titelthema gesetzt ist.

In der Episode zum vorliegenden Heft lotet Redakteurin Manon Bischoff gemeinsam mit Moderator Marc Zimmer die Bedeutung des noch jungen Fachgebiets der tropischen Geometrie aus und erläutert, wie durch systematische Vereinfachung neue mathematische Perspektiven entstehen. Außerdem erzählt meine Kollegin Verena Tang, warum Glaziologen das Abschmelzen des mächtigen antarktischen Thwaites-Gletschers mit großer Sorge beobachten und wie Klimaforscher die mögliche weitere Entwicklung abzuschätzen versuchen. Und Klaus-Dieter Linsmeier spricht über unseren Artikel zur Körpersäftemedizin der Antike, die auf die Gelehrten Hippokrates und Galen zurückgeht. Hören Sie selbst rein: spektrum.de/s/cast0619. Wir hoffen, unser Audioangebot im Plauderton gefällt Ihnen. Schreiben Sie mir gern Ihre Meinung!

Jenseits des Dreiklangs zum aktuellen Heft machen wir auf **Spektrum**.de zahlreiche weitere Wissenschaftspodcasts kostenfrei für Sie verfügbar. Diese stammen aus ausgewählten Quellen und decken eine große thematische Bandbreite ab. So habe ich schon Beiträgen über die Klimabilanz des Grillens gelauscht, über die Zukunft der privaten Raumfahrt sowie zur Verteidigungsschrift Johannes Keplers im Hexenprozess gegen seine Mutter. All dies finden Sie unter spektrum.de/podcast.

Jetzt aber ans Lesen!

Eine gute Lektüre wünscht
Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 2.19 entführt Sie in die geheimnisvolle Welt der Tiere.

IN DIESER AUSGABE



ANTOINE CHAMBERT-LOIR

Der französische Mathematiker ist vertraut mit Algebra und Arithmetik. Ab S. 12 stellt er das aufstrebende Forschungsgebiet der tropischen Geometrie vor.



EREZ LIEBERMAN AIDEN

Der US-Forscher untersucht die Architektur des menschlichen Genoms. Darin spielen tausende DNA-Schlaufen eine medizinisch wichtige Rolle (S. 32).



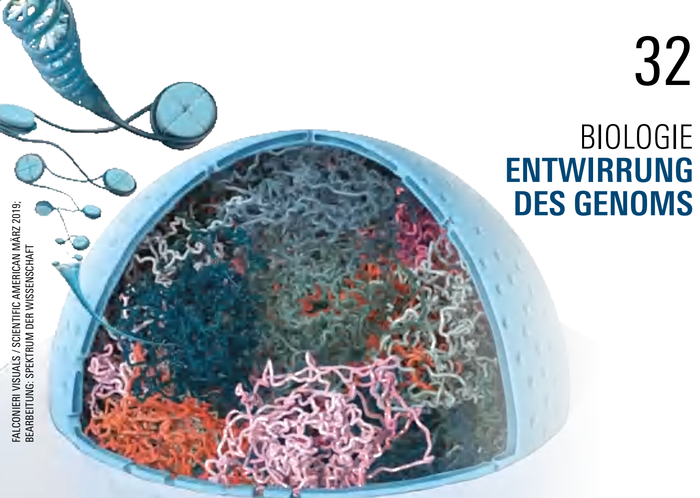
R. BRIAN FERGUSON

Der Anthropologe geht ab S. 82 der Frage nach dem Ursprung militärischer Konflikte auf den Grund: Liegt Krieg in der Natur des Menschen – oder ist er ein Produkt unserer Kultur?

INHALT

TITELBILD: HENRYK NAGEL, TU BERLIN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

HENRYK NAGEL, TU BERLIN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



FALCONIERI VISUALS / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



RYUSEUNGIL / GETTY IMAGES / ISTOCK



NASA/JPL/USGS



RUSLAN GILMANSHIN / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



SPEKTROGRAMM

BLAUE RIESEN-STABSCHRECKEN

Wissenschaftler haben zwei neue Arten der Riesenstabschrecken entdeckt, die im Norden Madagaskars leben. Die beiden Spezies *Achrioptera manga* (Foto) und *Achrioptera maroloko* fallen in mehrfacher Hinsicht auf. Die Weibchen werden bis zu 24 Zentimeter lang, noch mehr aber überraschen die Männchen, die mit der Geschlechtsreife grellbunt werden. Das ist sehr ungewöhnlich, denn Stabschrecken sind normalerweise gut getarnt und ähneln Zweigen. Die Forscher um Frank Glaw von der Zoologischen Staatssammlung München spekulieren, warum die Aufgabe

FRANK GLAW, SNSB-ZOOLOGISCHE STAATSSAMMLUNG MÜNCHEN



des Tarnungsvorteils sich evolutionär durchsetzen konnte. Um Paarungspartner zu finden, müssen die Männchen sich mehr bewegen, was es schwieriger macht, sich als Pflanzenteil auszugeben. Möglicherweise zahlt sich deshalb die entgegengesetzte Taktik aus, Warnfarben anzunehmen, die Giftigkeit signalisieren. Es ist aber noch unklar, ob die Tiere tatsächlich toxische Abwehrstoffe produzieren oder diese aus der Nahrung aufnehmen und in ihrem Körper anreichern.

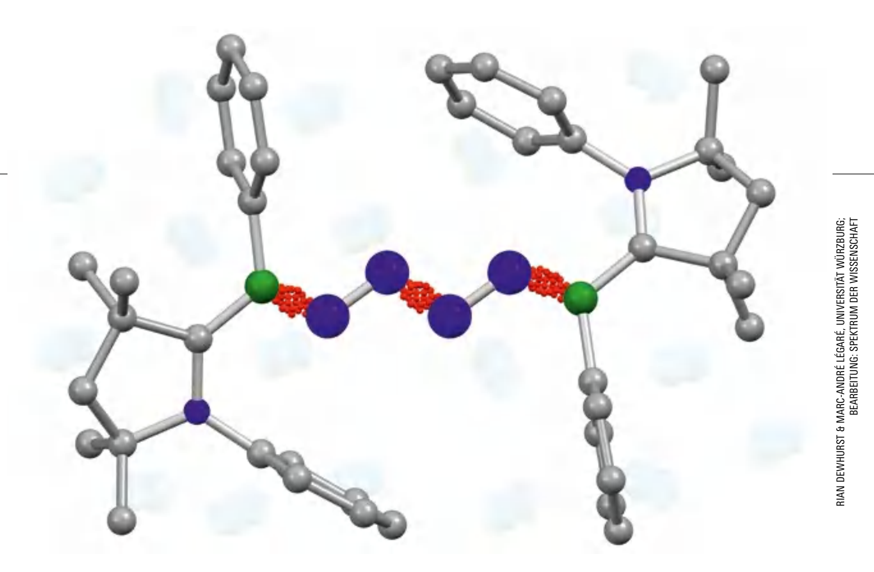
Frontiers in Ecology and Evolution 10.3389/fevo.2019.00105, 2019

FRANK GLAW, SNSB-ZOOLOGISCHE STAATSSAMMLUNG MÜNCHEN

CHEMIE
WIDERSPENSTIGER STICKSTOFF GEZÄHMT

Zwei äußerst unwillige Partner hat eine Arbeitsgruppe aus Deutschland nahezu gewaltfrei miteinander gekoppelt: Das Team um Holger Braunschweig von der Universität Würzburg brach eine der stabilsten Bindungen der Chemie und verband zwei Moleküle herkömmlichen Luftstickstoffs zu einer Viererkette. Wie die Gruppe im Fachblatt »Science« berichtet, funktioniert der neue Syntheseweg bei minus 30 Grad Celsius und unter einem Stickstoffdruck von rund vier Bar. Als Nächstes will das Forscherteam die neuen Stickstoffketten in organische Moleküle integrieren, die für Medizin und Pharmazie relevant sind, beispielsweise blutgefäßerweiternde Medikamente.

Das Molekül N_2 macht 78 Prozent der Atmosphärenluft aus, doch es lässt sich nicht einfach in nützliche Substanzen verwandeln, denn das Gas ist sehr reaktionsträge. Nur spezialisierte Organismen wie bestimmte Algen, Bakterien oder Pflanzen wandeln Stickstoff zu verwertbaren Substanzen um und machen das Element auf diese Weise allen anderen Organismen auf der Erde verfügbar.



RIAN DEWHURST & MARC-ANDRÉ LÉGARÉ, UNIVERSITÄT WÜRZBURG; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Mittels borhaltiger (grün) Hilfsmoleküle (grau) koppeln Forscher zwei Stickstoffmoleküle (blau, Bildmitte) direkt zusammen.

Bei dem neuen Verfahren koppeln Braunschweig und sein Team mit Hilfe borhaltiger Verbindungen zwei Moleküle N_2 direkt zu einer N_4-Kette zusammen. Die Stickstoffviererkette existiert dann innerhalb eines Komplexes und liegt wie in einer Werkbank eingespannt zwischen zwei borhaltigen Hilfsmolekülen. Bei anderen Methoden sind deutlich drastischere Bedingungen erforderlich, um die starken Bindungen zu brechen: Beim industriell verwendeten Haber-Bosch-Verfahren braucht man Temperaturen bis 500 Grad Celsius, Drücke von mehreren hundert Bar und spezielle Katalysatoren, um Stickstoff mit Wasserstoff zu Ammoniak zu verbinden. Letzteres dient dann als Ausgangsstoff für Düngemittel, Pharmazeutika, Farben oder Kunststoffe – ein Umweg, den die Arbeitsgruppe zu vermeiden hofft. Denn die neue Methode könnte die direkte Erzeugung längerer stickstoffhaltiger Ketten- und Ringmoleküle ermöglichen, ohne dass man den Grundstoff aus der Atmosphäre vorher erst unter großem Aufwand in Ammoniak umwandeln muss.

Science 10.1126/science.aav9593, 2019

GEOWISSENSCHAFTEN
VULKANISCHE WOLKEN GLEITEN AUF LUFTKISSEN

Zahlreiche Opfer von Vulkanausbrüchen sterben durch heiße Wolken aus Asche und Gas, die mit der Geschwindigkeit eines Kleinflugzeugs heranrasen. Diese »pyroklastischen Ströme« entstehen, wenn die vulkanische Aschesäule kollabiert, sie verhalten sich einer Flüssigkeit ähnlich und können noch dutzende Kilometer vom Ausbruchsort entfernt immense Schäden anrichten. Bisher war unklar, wie sie so weit kommen.

Ein Team um Gert Lube von der Massey University in Neuseeland präsentiert nun eine Antwort. Wie die Forscher herausgefunden haben, führen der Gasgehalt und die hohen Scherkräfte in der Wolke zu einem Druckgefälle, das Gas in Richtung Boden befördert, so dass die aschehaltige Wolke wie auf einem Luftkissen gleitet. Das Team ließ erhitzte Asche aus einer früheren Eruption des Vulkans Taupo auf eine Rutsche fallen, um den Kollaps der vulkanischen Aschesäule zu simulieren. Videoaufnahmen und Computersimulationen ließen erkennen, dass sich innerhalb des entstehenden Aschestroms zwei Bereiche ausbilden: eine von außen sichtbare, blumenkohlähnliche äußere Zone sowie ein dichter Unterstrom aus 40 Prozent Asche und 60 Prozent vulkanischen Gasen.

Letzterer bewegt sich sehr schnell und entwickelt in seinem Inneren einen starken Druckgradienten. Unter ihm bildet sich eine zwei bis vier Zentimeter dicke Schicht, die nur etwa halb so viel Asche enthält wie die Schicht darüber und deswegen relativ wenig Reibung erzeugt – der pyroklastische Strom hebt wie ein Luftkissenfahrzeug ab. Infolgedessen beschleunigt er sehr stark, und die daraus entstehenden Scherkräfte halten das Druckgefälle aufrecht, was in einer positiven Rückkopplung das Luftkissen stabilisiert. So erreichen die Ströme einerseits ihre enorme Geschwindigkeit und andererseits ihre bemerkenswerte Reichweite.

Auch große Lawinen und Schuttströme sind mitunter »hypermobil«, also viel schneller und langlebiger als erwartet. Möglicherweise erzeugen auch diese Phänomene ein Luftkissen.

Nature Geoscience 10.1038/s41561-019-0338-2, 2019

TEILCHENPHYSIK
NEUES PUZZLESTÜCK IM ANTIMATERIE-RÄTSEL

Physiker haben einen weiteren Unterschied zwischen Materie und Antimaterie dingfest gemacht, berichtet das Genfer Kernforschungszentrum CERN. Das Ergebnis hilft, das kosmische Ungleichgewicht zwischen den beiden Materieformen zu verstehen: Menschen, Planeten und Sterne bestehen fast nur aus Materie; Antimaterie hingegen fristet ein Exotendasein.

Um dem Grund dafür auf die Spur zu kommen, suchen Wissenschaftler nach subatomaren Prozessen, die im Urknall etwas mehr Materie als Antimaterie hervorgebracht haben könnten. In den vergangenen Jahrzehnten sind sie dabei immer wieder fündig geworden, beispielsweise bei so genannten K- und B-Mesonen. Die kurzlebigen Partikel bestehen jeweils aus zwei der insgesamt sechs Quarksorten und tauchen in großer Menge in Teilchenbeschleunigern auf.

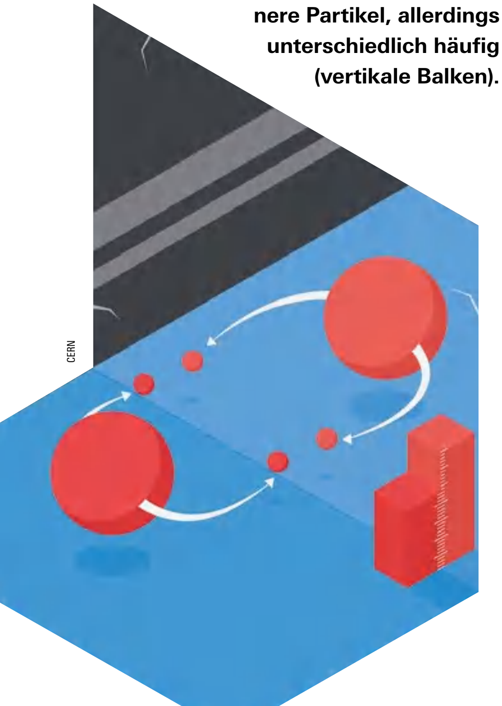
Es gibt auch Antimesonen – sie sind aus den jeweiligen Antiteilchen der beiden enthaltenen Quarks aufgebaut. Ihr Zerfall läuft nicht exakt symmetrisch zu der Materievariante ab. Bereits in den 1960er Jahren haben das Experimente bei K-Mesonen gezeigt; bei B-Mesonen ist eine Verletzung der so genannten CP-Symmetrie seit Beginn der 2000er Jahren bekannt.

Wie nun die neuen Messungen am LHC-Beschleuniger zeigen, macht die Natur auch bei einer weiteren Mesonenart einen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie: Beim Zerfall so genannter D^0-Mesonen, die unter anderem aus Charmquarks bestehen, sei die CP-Symmetrie ebenfalls verletzt, berichtete das Team des LHCb-Detektors. Der am LHC gesammelte, riesige Datenberg der Jahre 2011 bis 2018 brachte jetzt den Nachweis, was Forscher lange vermutet hatten.

Zusammen mit bereits bekannten Unterschieden kann die neue Abweichung einen Teil der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum erklären. Laut Experten sind jedoch weitere subatomare Prozesse nötig, in denen gewöhnliche Materie die Nase vorne hat. Wissenschaftler spüren seit Jahren einer entsprechenden Fährte bei Neutrinos nach; hier reichen die gesammelten Daten aber noch nicht für eine sichere Aussage.

CERN-Pressemitteilung, 21. 3. 2019

Das D^0-Meson (Kugel rechts) und sein Antimaterie-Gegenstück (Kugel links) zerfallen beide in kleinere Partikel, allerdings unterschiedlich häufig (vertikale Balken).



CERN

ARCHÄOLOGE
INKA OPFERTEN MEERSCHWEINCHEN

Neue Hinweise bestätigen: Die Inka waren kreative Erfinder von Opferritualen. Ihre Praxis, Menschen zu opfern, ist weithin bekannt, doch wesentlich öfter brachten sie Tiere dar, um ihre Götter gewogen zu stimmen. Lidio Valdez, Archäologe am Institut für Andenforschung im kanadischen Edmonton, berichtet nun von einer ungewöhnlichen Variante dieser Kultpraktik. Im südperuanischen Tambo Viejo, einem Verwaltungszentrum der Inka, grub er gemeinsam mit seinem Team rund hundert Meerschweinchenmumien aus. Viele Tiere waren sorgfältig mit bunten Bändern geschmückt, die sie als Ohrringe oder Halsbänder trugen, einige waren in Baumwolltücher gehüllt worden, bevor man sie begrub. In dem trockenen Klima haben sie sich erstaunlich gut erhalten – ähnlich den menschlichen Andenmumien. Holzkohle, die auszusammen mit den Tieren gefunden wurde, datieren die Forscher auf etwa 400 Jahre; die Rituale wurden also offenbar nach der spanischen Eroberung durchgeführt. Tatsächlich haben wohl auch Konquistadoren noch solche Meerschweinchenopferungen beobachtet, wie Chroniken zu entnehmen ist. Archäologische Nachweise dazu waren aber bislang rar.

In Tambo Viejo sollten die pelzigen Nager womöglich ein gutes Gelingen von Bauarbeiten garantieren und die Gebäude beschützen, die über ihnen errichtet wurden. Denn stets fanden die Archäologen deren Überreste unter Fußböden. Die kleinen Tierkörper zeigen keine Hinweise auf tödliche Verletzungen – vermutlich wurden die Meerschweinchen lebendig begraben.

Offenbar hielten die Bewohner von Tambo Viejo die Tiere vorher in einem Gehege, dessen Spuren die Forscher innerhalb eines Gebäudes identifizierten. Dort fanden sie auch Futterreste und Meerschweinchenfäkalien. Die domestizierten Nager dienten aber wohl nicht nur rituellen Zwecken, sondern auch als Nahrung für die Bevölkerung – noch heute ist Meerschweinchenfleisch eine Spezialität der peruanischen Küche. Den Göttern brachten die Inka vermutlich nur die schmackhaftesten Exemplare dar: Unter den Fußböden lagen fast ausschließlich Jungtiere, deren Fleisch besonders zart ist.

Zwar sind Meerschweinchenopfer auch aus anderen Inkastätten bekannt. Doch nirgends sonst wurden die Tiere so sorgfältig ausgewählt und mit bunten Bändern geschmückt wie in Tambo Viejo. Den Ursprung dieses Brauchs vermutet Valdez in lokalen Traditionen, die weit in die Zeit vor den Inka zurückreichten.

International Journal of Osteoarchaeology 10.1002/oa.2755, 2019

TECHNIK

KREBSSCHEREN-NACHBAU SCHIESST MIT HEISSEM PLASMA

Zwei Ingenieurwissenschaftler haben eine bemerkenswerte Erfindung der Tierwelt nachgebaut: den »Pistolenschuss-Apparat« der Knallkrebse *(Alpheidae)*. Diese Tiere besitzen eine vergrößerte Schere, die beim Zuschnappen mittels eines scharfen Wasserstrahls ein mehr als 4000 Grad heißes Plasma samt starker Stoßwelle entstehen lässt. Xin Tang und David Staack von der Texas A&M University haben eine Schere vermessen, die ein Krebs der Spezies *Alpheus formosus* abgeworfen hatte, um den Mechanismus präzise im 3-D-Drucker nachzubilden.

Hinter der erstaunlichen Fähigkeit der Tiere steckt ein Phänomen namens Kavitation. Wenn die Tiere ihre Schere mit hoher Geschwindigkeit zuschnappen lassen, bildet sich ein Wasserstrahl, der vor der Scherenspitze eine Gasblase produziert, die sofort wieder in sich zusammenfällt. Bei diesem Kollaps heizt sich das Gas in der Blase stark auf und wird zu einem Plasma, das eine energiereiche Stoßwelle ins Wasser schickt. Die von ihr verursachten Erschütterungen, mit denen das Tier unter anderem Fressfeinde abwehrt, sind mit bis zu 210 Dezibel weit lauter als ein Pistolenschuss und können unter Umständen sogar das Sonar von Schiffen stören.

Fachleute versuchen seit Jahren, das Prinzip technisch nachzuahmen, doch bisherige Versuche gelangen nur eingeschränkt. Tang und Staak haben nun ein Modell geschaffen, mit dem sich der Vorgang präzise untersuchen lässt. Um den Blitz ihres Nachbaus mit der Kamera aufzuzeichnen, dotierten sie das Plasma mit dem Edelgas Argon, was stärkere Emissionen zur Folge hat. Wie sich dabei herausstellte, entsteht das Plasma etwa eine tausendstel Sekunde nach dem Zuschnappen der nachgebauten Schere.

Die beiden Forscher sehen ihre Konstruktion als Möglichkeit, den Mechanismus hinter der Plasmabildung genauer zu verstehen, der anscheinend stark von der Geometrie der Schere und des Schusskanals abhängt. Die Krebsschere erzeuge Plasma in Flüssigkeiten deutlich effektiver als Verfahren mit Lasern, Elektrizität oder verschiedenen mechanischen Geräten, so die Forscher. Für eine entsprechende »Plasmawaffe« gäbe es diverse Einsatzbereiche; sie könnte beispielsweise Löcher in Gestein schießen oder sogar verschmutztes Wasser reinigen. Um sie technisch anzuwenden, müsste allerdings erst einmal eine größere Version des Mechanismus konstruiert werden.

Science Advances 10.1126/sciadv.aau7765, 2019


Knallkrebse haben eine vergrößerte Schere, mit der sie starke Stoßwellen erzeugen.

PALÄONTOLOGIE

MASSENGRAB AN DER KREIDE-PALÄOGEN-GRENZE

Eine mehr als ein Meter dicke Sedimentschicht im US-Bundesstaat North Dakota, die aus der Übergangszeit zwischen Kreide und Paläogen stammt, deuten Forscher als Zeuge des katastrophalen Meteoriteneinschlags, der letztlich wohl das Aussterben der Dinosaurier verursachte. Die Paläontologen um Robert DePalma von der University of Kansas stießen in der Fundstätte Tanis der Hell-Creek-Formation auf eine chaotische Ansammlung von Süßwasserfisch-, Ammoniten-, Insekten- und Pflanzenfossilien. Zusätzlich fanden sich dort erhöhte Konzentrationen des chemischen Elements Iridium sowie zahlreiche Tektiten (zu Glas geschmolzene Gesteinskügelchen).

Wo heute die Hell-Creek-Formation ist, befanden sich am Ende der Kreidezeit offensichtlich Flusstäler, die in ein Epikontinentalmeer mündeten. Dieses erstreckte sich bis zum Golf von Mexiko. Der Meteoriteneinschlag vor 66 Millionen Jahren, der den Chicxulubkrater im heutigen Mexiko hinterließ, dürfte Erdbeben einer Stärke von 10 oder 11 ausgelöst haben. Dadurch, so die Forscher, schaukelten sich bis zu zehn Meter hohe Wellen auf, die durch die Flusstäler rasten und Land- und Wasserbewohner zusammenspülten. Als sich das Wasser wieder zurückzog, wurde dieser Friedhof von Tektiten bombardiert, die der Meteoriteneinschlag ausgeworfen hatte und die sich heute unter anderem in den Kiemen einiger fossiler Fische finden. 10 bis 20 Minuten nach der ersten Flut folgte eine zweite Riesenwelle, die schließlich die gestrandeten und zusammengeworfenen Tiere und Pflanzen mit Kies, Sand und Schlamm überdeckte – und so ihre Versteinerung ermöglichte.

Die Forscher deuten ihren Fund als ersten Nachweis eines Massengrabs größerer Organismen, das mit der Kreide-Paläogen-Grenze in Verbindung gebracht werden kann. Diese Grenze



ROBERT DEPALMA, THE PALM BEACH MUSEUM OF NATURAL HISTORY (PBMNH)

Fossilien von übereinanderliegenden Fischen deuten darauf hin, dass die Tiere an der Kreide-Paläogen-Grenze von einer Woge an Land geschleudert und kurz darauf von Sediment bedeckt wurden. Das Ganze muss sehr schnell geschehen sein – möglicherweise infolge jenes Meteoriteneinschlags, der wohl auch das Ende der Dinosaurier besiegelte.

markiert das Ende der Dinosaurier und fällt weltweit durch ihre charakteristische hohe Iridiumkonzentration in der entsprechenden Sedimentschicht auf. Unmittelbar über der Hell-Creek-Lagerstätte schließt sich eine Schicht an, in der fossile Farne dominieren – typische Gewächse eines sich langsam erholenden Ökosystems.

Sollten sich die Datierungen bestätigen, würde der Fund die These bekräftigen, dass tatsächlich ein Meteorit das Ende der Dinosaurier besiegelte. Zusammen mit ihnen starben damals etwa 75 Prozent aller Arten aus. Eine Minderheit unter Geologen und Paläontologen führt dies dagegen auf große Vulkanausbrüche im heutigen Indien zurück, die das Weltklima entscheidend verändert und so schon hunderttausende Jahre vor dem Chicxulubeinschlag den Niedergang der Riesen eingeläutet hätten.

PNAS 10.1073/pnas.1817407116, 2019

TROPISCHE GEOMETRIE
DAS SKELETT DER AMÖBE

Jüngst entstand ein neues Fachgebiet, bei dem Mathematiker geometrische Objekte so stark verändern, dass nur ein »Skelett« der eigentlichen Form zurückbleibt. Dennoch behalten die Strukturen viele ihrer ursprünglichen Eigenschaften bei – wodurch sie unerwartete Geheimnisse offenbaren.



Antoine Chambert-Loir ist Mathematikprofessor an der Université Paris-Diderot. Er hat sich auf algebraische und arithmetische Geometrie spezialisiert.

spektrum.de/artikel/1640006

Wenn man ein kompliziertes mathematisches Problem lösen möchte, erweist sich der direkte Weg manchmal als schwierig. In diesen Fällen lohnt es sich, vom gewohnten Pfad abzuweichen und einen Umweg in Kauf zu nehmen.

In einer solchen Situation befand sich Gerolamo Cardano im 16. Jahrhundert. Damals biss er sich an der Lösung kubischer Gleichungen die Zähne aus. Doch irgendwann kam ihm eine zündende Idee, welche die moderne Mathematik auf ungeahnte Weise prägen sollte: Er führte während seiner Berechnungen Wurzeln aus negativen Zahlen ein – heute sind sie als imaginäre Zahlen bekannt. Er maß ihnen keine besondere Bedeutung bei, sie halfen ihm aber, die kniffligen Aufgaben zu lösen. Inzwischen haben sich komplexe Zahlen, die sich aus reellen und imaginären Zahlen zusammensetzen, als so wichtig herausgestellt, dass viele aktuelle Fortschritte der Naturwissenschaften ohne sie nicht denkbar wären.

Indem man gewöhnliche Gleichungen »tropisiert«, ähneln die dadurch entstehenden Objekte Amöben mit Tentakeln, die sich ins Unendliche erstrecken.

ANTOINE CHAMBERT-LOIR

AUF EINEN BLICK
TROPISCHE GEOMETRIE

1 In diesem jungen Forschungsgebiet ersetzt man die Addition zweier Zahlen durch den größten beider Werte und die Multiplikation durch ihre Summe.

2 Dadurch vereinfachen sich komplizierte Oberflächen zu tropischen Kurven, die sich aus mehreren Liniensegmenten zusammensetzen.

3 Trotz der massiven Veränderungen behalten die tropischen Kurven viele Eigenschaften der ursprünglichen Objekte bei, was neue Blicke auf alte mathematische Probleme ermöglicht.

$v = \log|y|$

$v = \log(e^u + 1)$

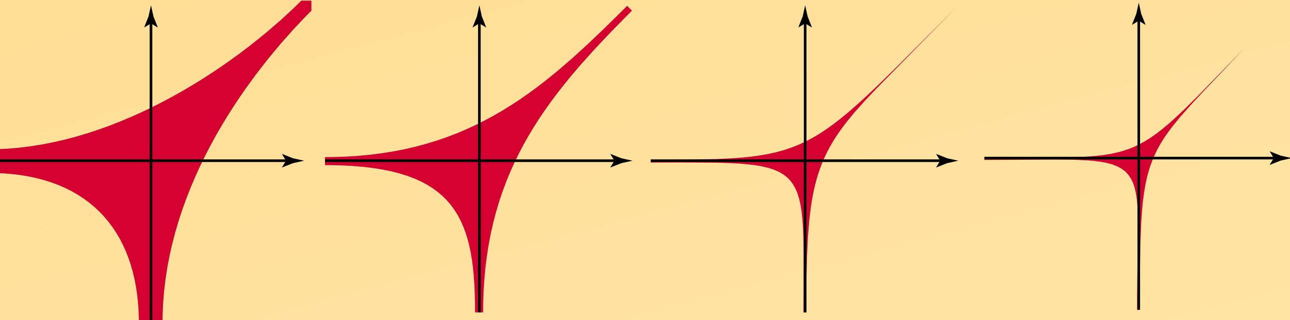
$v = \log(e^u - 1)$

$u = \log|x|$

$v = \log(1 - e^u)$

ANTOINE CHAMBERT-LOIR

Links: Der rot markierte Bereich in der Ebene ist die »Amöbe« der komplexen Geradengleichung $x + y = 1$. Ihr Skelett (blau) entspricht der tropischen Kurve. Sie ist durch alle Punkte (u, v) gegeben, für die mindestens zwei der Argumente u, v und 0 maximal sind. Unten: Indem man die Basis des Logarithmus (hier für $x + y = 1$) vergrößert, zieht sich die Amöbe immer weiter zusammen. Für den Grenzfall, bei dem die Basis gegen unendlich geht, bleibt nur noch ihr Skelett übrig.



Die tropische Geometrie ist ein weiteres Beispiel für einen zielführenden Umweg. Sie entstand in den 1980er Jahren und ist inzwischen zu einem aktiven Forschungsfeld herangewachsen, das auch andere mathematische Bereiche beeinflusst. Einer der größten Nutznießer dieser Entwicklung ist die algebraische Geometrie. Wie Mathematiker feststellten, kann es sich in diesem Gebiet lohnen, einen Schlenker über die tropische Geometrie zu machen. Denn einige Eigenschaften algebraischer Kurven lassen sich im tropischen Teil einfacher berechnen.

Um das nachzuvollziehen, muss man zuerst algebraische Kurven verstehen. Sie bestehen aus einer Menge von Punkten (x, y), die eine so genannte polynomiale Gleichung lösen, zum Beispiel $F(x, y) = axy^3 + bx^2y + cx + dy + f = 0$. Die Punkte x und y können dabei nicht bloß reelle, sondern auch komplexe Werte annehmen, also imaginäre Zahlen enthalten. In solchen Fällen besteht jede Variable $x = a + ib$ aus zwei reellen Koordinaten a und b und der imaginären Einheit i, die der Wurzel aus minus eins entspricht. Die ursprüngliche Gleichung $F(x, y) = 0$ hängt also von insgesamt vier reellen Koordinaten ab und spaltet sich in zwei unabhängige Teile auf: in einen Realteil ohne i und einen Imaginärteil mit i. Die entsprechende geometrische Figur ist dann streng genommen keine Kurve mehr, sondern eine Oberfläche im vierdimensionalen Raum.

Das mag abstrakt klingen, doch Mathematiker haben verschiedene Methoden entwickelt, um diese Objekte zu untersuchen. Allerdings stoßen sie dabei häufig an ihre Grenzen. Denn die algebraische Geometrie hat sich in vielen Punkten als äußerst schwierig entpuppt.

In den 1990er Jahren hatten die Forscher Israel Gelfand an der Rutgers University in New Jersey, Mikhail Kapranov, damals an der Northwestern University in Illinois, und Andrei Zelewinsky an der Northeastern University in

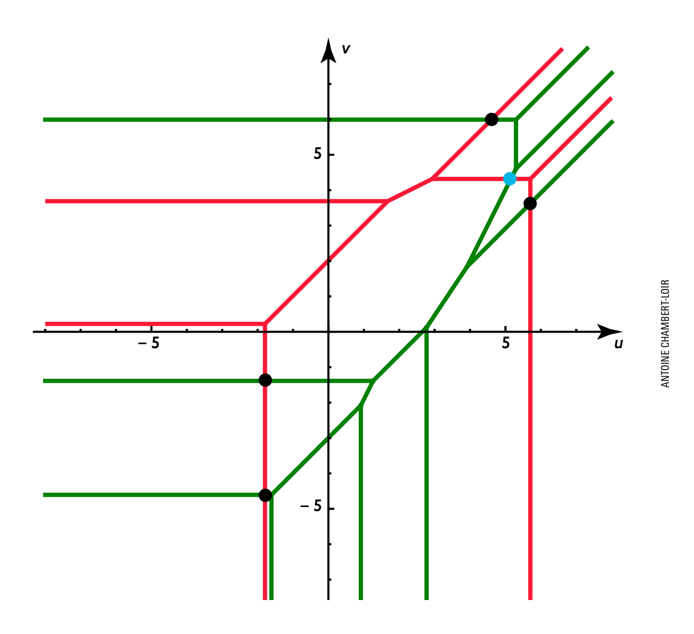
Boston eine merkwürdig erscheinende Idee für einen Umweg, der die Erforschung algebraischer Kurven erleichtern sollte. Anstatt direkt die komplexen Lösungen x und y einer Gleichung $F(x, y) = 0$ zu studieren, betrachteten sie die Logarithmen ihrer Beträge. Das heißt, sie visualisierten alle Punkte $(u, v) = (\log|x|, \log|y|)$. Weil die Beträge komplexer Zahlen reell sind, halbierten die Forscher so die Dimensionen des eigentlichen Problems: Aus den seltsamen Flächen im vierdimensionalen Raum werden gewöhnliche Kurven in der Ebene. Das Erstaunliche ist, dass dabei einige Eigenschaften der ursprünglichen Gleichung erhalten bleiben.

Komplizierte Gerade

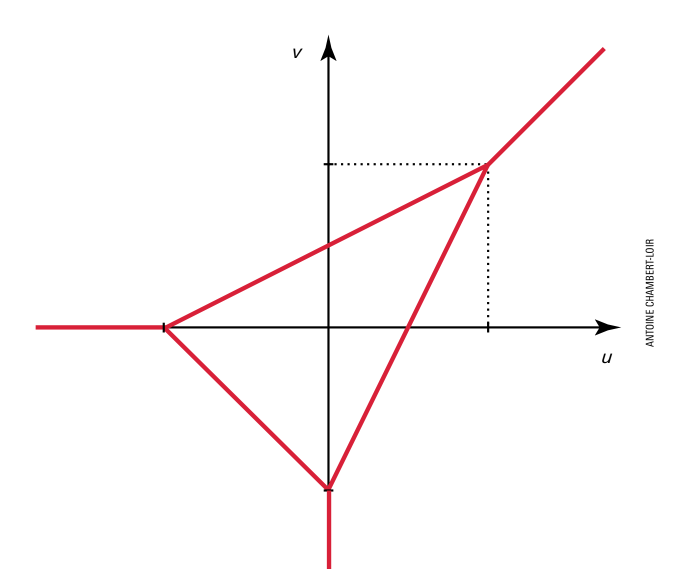
Um das zu erkennen, hilft ein Beispiel. In komplexen Koordinaten beschreibt die Geradengleichung $x + y - 1 = 0$ eine komplizierte Fläche. Betrachtet man dagegen die Logarithmen der Beträge von x und y, füllen diese Punkte einen Teil der zweidimensionalen Ebene aus, die durch drei Kurvengleichungen begrenzt ist (siehe Bild auf S. 13): Für negative u gehören alle Punkte (u, v) innerhalb von $v = \log(e^u + 1)$ und $v = \log(1 - e^u)$ zur Lösung, während für positive u alle zwischen $v = \log(e^u + 1)$ und $v = \log(e^u - 1)$ die Gleichung erfüllen.

Die Kurvengleichungen begrenzen ausufernde Bereiche, deren Form an Tentakel erinnert. Das ist keine Besonderheit der betrachteten Gerade, sondern ein Merkmal aller algebraischen Kurven. Wegen ihrer Ähnlichkeit zu den Wechseltierchen bezeichnen Mathematiker die geometrischen Objekte als Amöben.

Doch woher kommen diese Tentakel? Tatsächlich haben sie einen einfachen Ursprung. Sie entsprechen den Gebieten, in denen die Koordinaten x und y entweder sehr groß oder sehr klein sind. In der diagonalen Tentakel sind beispielsweise sowohl x als auch y groß, so dass sich die Gleichung $x + y = 1$ wie $y \approx -x$ verhält. Insbesondere stimmen die Beträge beider Zahlen überein, wodurch sich die diagonale Gleichung $v = u$ ergibt. Der linke Tentakel entspricht dagegen vernachlässigbar kleinen Werten von x. In diesem Fall vereinfacht sich die ursprüngliche Gleichung zu $y \approx 1$, woraus $v = \log|y| \approx 0$ folgt. Ebenso ergibt sich der untere Tentakel für kleine y aus $u = \log|x| \approx 0$.



Die Anzahl der Schnittpunkte zweier tropischer Kurven ist, wie für algebraische Kurven auch, gleich dem Produkt ihrer Grade. Im obigen Bild kreuzt der tropische Kegelschnitt (rot) $x^2 + 4xy - 300x - 40y - 50$ die kubische Kurve (grün) $\frac{1}{8}x^3 + x^2y + 2xy^2 + y^3 + 2x^2 + 15xy + 400y^2 + 5x + 100y + 1$ in $2 \cdot 3 = 6$ Punkten. Dabei zählt der blaue Punkt doppelt, weil diese Koordinaten zweimal in der Lösung auftauchen.



Die tropische Kurve der Funktion $F(x, y) = 1 + 2xy + x^3 + y^3$ entspricht den Punkten (u, v), für die mindestens zwei der vier Argumente 0, $\log 2 + u + v$, $3u$ und $3v$ maximal sind.

Indem man diese Extremfälle betrachtet, kann man das »Skelett« der Amöbe nachzeichnen. Für $x + y = 1$ besteht es aus drei Halbgeraden, die sich im Ursprung treffen. Die russischen Mathematiker Victor Maslov von der Lomonossow-Universität in Moskau und Oleg Viro, damals an der Universität Uppsala in Schweden, fanden heraus, wie es sich herausarbeiten lässt: Man ersetzt die Basis des Logarithmus, der die Koordinaten u und v definiert, durch immer größere Zahlen. Das hungert die Amöbe nach und nach aus und legt ihr Skelett frei (siehe Bild auf S. 13).

Dieses Phänomen verdankt man den Eigenschaften der Logarithmusfunktion. Sie wandelt beispielsweise die Multiplikation in eine Addition um: Wenn $z = xy$, dann ist $\log_b z = \log_b x + \log_b y$. Mit $w = \log_b z$ folgt also $w = u + v$. Während sich die Multiplikation vereinfacht, wird die Addition allerdings komplizierter: Für $z = x + y$ ist $w = \log_b(x + y) = \log_b(b^{\log x} + b^{\log y})$, also $w = \log_b(b^u + b^v)$.

Der letzte Ausdruck erscheint zwar recht umständlich, er nimmt aber eine einfachere Gestalt an, wenn die Basis b des Logarithmus sehr groß ist. In diesem Fall dominiert die größere der beiden Zahlen u und v, das heißt, nur sie bleibt im Grenzfall einer unendlich großen Basis übrig: $w = \max(u, v)$. Addition (+) und Multiplikation (·) werden also durch die Operationen »max« und + ersetzt. Heute ist diese »Max-

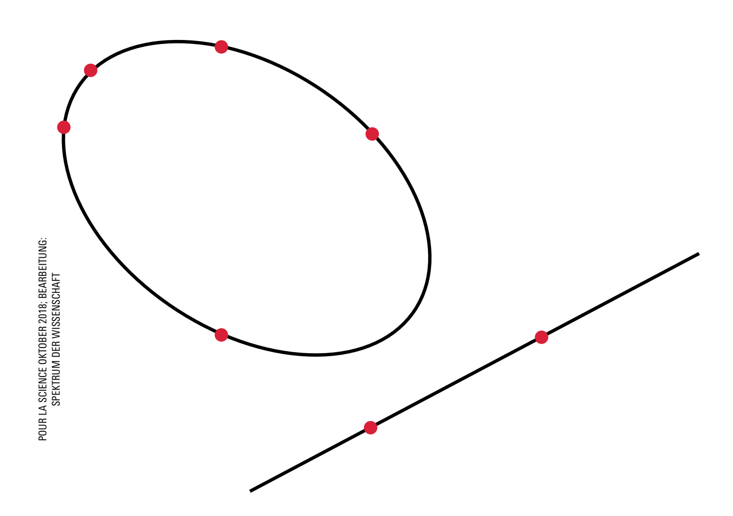
Plus-Algebra« als tropische Algebra bekannt (siehe »Exotische Namensgebung«, unten).

Jedes Polynom lässt sich derart in eine tropische Form übersetzen (siehe Bild links unten). Die Geradengleichung $x + y - 1 = 0$ wird beispielsweise zu max $(u, v, 0)$. Diese tropische Kurve entspricht den drei Halbgeraden, die das Skelett der Amöbe nachzeichnen. Die tropische Gleichung von $a \cdot x^n$ ist demzufolge $\log|a| + n \cdot u$, und das Polynom $5x^2 - 4y^3 - 2$ vereinfacht sich analog zu max $(\log 5 + 2u, \log 4 + 3v, \log 2)$.

Zwei Eigenschaften haben alle algebraischen Kurven gemeinsam: Ihr Skelett besteht immer aus gebietsweise linearen Funktionen; und ihre Amöbe setzt sich stets aus endlich vielen konvexen Bereichen zusammen. Letzteres bedeutet, dass sich entweder zwei Punkte außerhalb der Amöbe durch eine Gerade verbinden lassen oder dass es keine stetige Kurve gibt, die beide Punkte verknüpft, ohne die Amöbe zu kreuzen. Sprich: Die Gebiete haben stets die Form einer Amöbe mit langen Tentakeln. Im Gegensatz zu den betrachteten Beispielen ist die grafische Darstellung des Skeletts und der Amöbe einer polynomialen Gleichung aber nicht immer einfach. Daher haben sich tropische Kurven inzwischen als eigenständiges Forschungsthema etabliert.

Was macht diese seltsamen Objekte für Mathematiker überhaupt interessant? Einer ihrer Reize ist, dass sie trotz ihrer Einfachheit die ursprüngliche komplexe Kurve ziemlich genau widerspiegeln. Komplizierte algebraische Fragestellungen verwandeln sich auf tropischer Ebene in rein kombinatorische Probleme, die ein Computer lösen kann (siehe **Spektrum** November 1995, S. 20).

Denn erstaunlicherweise haben tropische und algebraische Kurven viele Gemeinsamkeiten. Ein Beispiel dafür zeigt sich im »Satz von Bézout«, wonach die Anzahl der Schnittpunkte zweier Kurven gleich dem Produkt ihres jeweiligen Grades ist, das heißt des höchsten Exponenten der Variablen x und y im Polynom $F(x, y)$. Überraschenderweise lässt sich der Satz von Bézout auch auf tropische Kurven übertragen (siehe Bild links oben) – in diesem Fall ist er sogar allgemeiner. Die tropische Version des Theorems



Zwei Punkte in einer Ebene definieren genau eine Gerade. Durch fünf willkürlich verteilte Punkte verläuft genau ein Kegelschnitt (hier eine Ellipse). Für Kurven höheren Grades gibt es ähnliche Beziehungen. 2005 legten Mathematiker dazu einen Beweis vor, den sie mit Hilfe der tropischen Geometrie führten.

stellt keinerlei Bedingungen an die zwei Geraden, während die algebraische Variante erfordert, dass sie sich nicht über eine gewisse Strecke überlappen. Der tropische Satz von Bézout bietet zudem einen weiteren Vorteil: Neben der Anzahl an Schnittpunkten liefert er auch Hinweise darauf, wo sie zu finden sind.

Zählen von Lösungen

Dass solche Theoreme aus der algebraischen Geometrie einfach auf tropische Objekte übertragbar sind, verwundert Mathematiker. Doch das gibt ihnen ein neues Werkzeug in die Hand. So konnten sie in den letzten Jahren die Gemeinsamkeiten von tropischen und algebraischen Kurven nutzen, um komplizierte Beweise zu vereinfachen.

Das wohl prominenteste Beispiel dafür findet sich in der enumerativen Geometrie, einem der ältesten mathematischen Bereiche. Schon in der Antike interessierten sich Gelehrte für die Anzahl von Lösungen geometrischer Probleme. Apollonios von Perge fragte sich etwa, wie viele Kreise man zeichnen kann, die drei vorgegebene Kreise gleichzeitig berühren. Im 16. Jahrhundert fand man heraus, dass die Aufgabe immer acht Lösungen hat – unabhängig davon, wie die drei vorgegebenen Kreise angeordnet sind. Auch Euklid beschäftigte sich mit dem Zählen von Lösungen. Er postulierte im dritten Jahrhundert vor Christus, dass es nur eine Gerade gibt, die durch zwei beliebig platzierte Punkte verläuft. Seither versuchen Mathematiker das Problem zu verallgemeinern (siehe Bild oben): Wie viele Kurven bestimmten Grades verlaufen durch drei oder mehr willkürlich verteilte Punkte in der Ebene oder in einem komplizierteren Raum?

Im 17. Jahrhundert hatte sich der französische Mathematiker Blaise Pascal jener Aufgabe für Figuren gestellt, die sich aus dem Schnitt eines Kegels mit einer Ebene ergeben (»Kegelschnitte«). Zu diesen Kurven zweiten Grades zählen

Exotische Namensgebung

Woher stammt der Name »tropische« Geometrie? Häufig übernehmen Mathematiker Begriffe aus der Alltagssprache, ohne jeglichen Bezug zu ihrem wörtlichen Sinn. Das ist auch hier der Fall. In seinen Anfängen hieß der Bereich exotische Algebra, danach wurde er bis Ende der 1980er Jahre Max-Plus-Algebra genannt. Inzwischen ist er zur »tropischen Algebra« geworden, auf Anregung mehrerer theoretischer Informatiker von der Universität Paris-VII, die ihrem brasilianischen Kollegen Imre Simon, einem Pionier auf diesem Gebiet, Tribut zollen wollten.

Rationale Kurven

Geraden und Kegelschnitte (unten) sind die einfachsten Beispiele so genannter rationaler Kurven. Das hat mit ihrer algebraischen Beschreibung zu tun. Tatsächlich kann man eine Kurve auf mehrere Arten darstellen. Die erste Möglichkeit ist, sie durch eine gewöhnliche Gleichung $F(x, y) = 0$ auszudrücken. Das erweist sich als hilfreich, wenn man prüfen möchte, ob ein Punkt (A, B) auf der Kurve liegt. Dazu setzt man seine Koordinaten in die Gleichung ein und prüft, ob auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens das gleiche Ergebnis steht.

Möchte man dagegen herausfinden, welche Punkte auf der Geraden liegen, eignet sich eine andere Darstellung besser. Durch eine geeignete »Parametrisierung« hängt beispielsweise eine Gerade, die durch die Punkte (x_A, y_A) und (x_B, y_B) verläuft, nur von einem Parameter t ab, wird dafür aber durch zwei Gleichungen beschrieben:

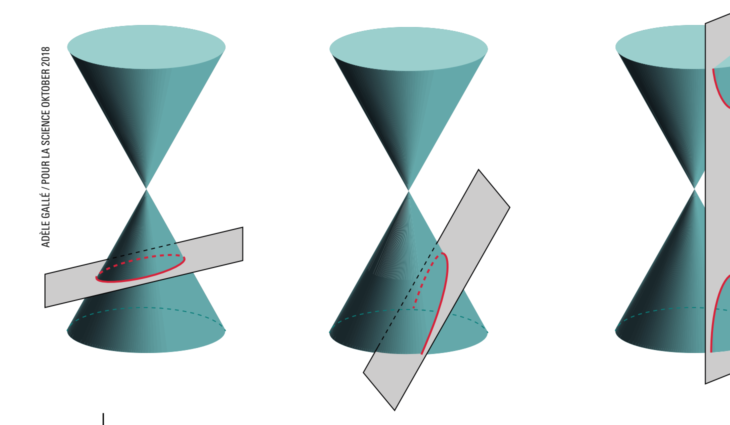
$$x(t) = (1-t) \cdot x_A + t \cdot x_B \qquad y(t) = (1-t) \cdot y_A + t \cdot y_B$$

Um einen Punkt $(x(t), y(t))$ der Geraden zu berechnen, muss man einen Wert für t in beide Gleichungen einsetzen.

Rationale Kurven zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich durch einen Quotienten zweier Polynome $P(t)$ und $Q(t)$ parametrisieren lassen. Für einen Kreis mit Mittelpunkt in 0 und Radius 1, dessen Gleichung also $x^2 + y^2 - 1 = 0$ lautet, ergibt sich beispielsweise:

$$x(t) = (1-t^2) / (1+t^2)$$

$$y(t) = 2t / (1+t^2)$$



Kegelschnitte ergeben sich aus dem Schnitt eines Kegels mit einer Ebene. Diese Kurven lassen sich durch polynomiale Gleichungen $F(x, y) = 0$ zweiten Grades beschreiben.

Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln. Er fand heraus, dass fünf beliebig verteilte Punkte – von denen höchstens zwei auf einer Geraden liegen – eindeutig einen Kegelschnitt definieren. Geometer fragten sich daraufhin, ob solche enumerativen Probleme für alle algebraischen Kurven allgemein gelöst werden können. Wie sich herausstellte, gibt es zumindest eine bestimmte Klasse, so genannte rationale Kurven, für die das möglich ist (siehe »Rationale Kurven«, links). Und die tropische Geometrie sollte den Beweis dieser Aussage drastisch vereinfachen.

Erst 1994 fand der französisch-russische Geometer Maxim Kontsevich, der heute am Institut des Hautes Études Scientifiques (IHES) in der Nähe von Paris arbeitet, eine Methode, um rationale Kurven zu zählen. Er leitete eine Formel her, welche die Anzahl N_d aller rationalen Kurven d-ten Grades berechnet, die $3d - 1$ Punkte in der Ebene durchqueren.

Aus Kontsevichs Formel folgt unter anderem, dass es zwölf Kurven dritten Grades gibt, die durch acht vorgegebene Punkte verlaufen ($N_3 = 12$); dass 620 Kurven vierten Grades elf Punkte durchqueren ($N_4 = 620$) und 87 304 Kurven fünften Grades 14 Punkte schneiden ($N_5 = 87\,304$). Diese Ergebnisse waren schon vorher bekannt. Mit Kontsevichs Formel kann man jedoch Kurven beliebig hohen Grades auf einfache Weise zählen. Sie lieferte unter anderem die bislang unbekannten Werte: $N_6 = 26\,312\,976$, $N_7 = 14\,616\,808\,192$ und $N_8 = 13\,525\,751\,027\,392$. Obwohl die Zahlen rasant ansteigen, bleiben sie stets endlich. Das mag auf den ersten Blick erstaunlich wirken, aber die $3d - 1$ Punkte legen eine komplexe rationale Kurve fest (siehe »Wie Punkte in der Ebene komplizierte Kurven festlegen«, rechts).

Elf Jahre nach Kontsevichs bahnbrechender Veröffentlichung fanden Andreas Gathmann und Hannah Markwig von der Universität Kaiserslautern eine tropische Version von Kontsevichs Formel. Sie zählt alle tropischen Kurven d-ten Grades, die $3d - 1$ Punkte kreuzen. Zusammen mit einer Arbeit von Grigory Mikhalkin von der Universität Genf, in der er eine Verbindung zwischen algebraischen Kurven d-ten Grades und ihren tropischen Analoga fand, liefert das Ergebnis einen einfacheren Beweis für Kontsevichs Formel.

Die Rückkehr ins Reelle ist nicht immer einfach

Allerdings vermag man damit lediglich komplexe Kurven zu zählen. Beschränkt man sich auf rein reelle Objekte, gestaltet sich das Problem weitaus schwieriger. Ihre Anzahl hängt nämlich von der genauen Verteilung der Punkte im Raum ab. Erst 2002 fand der Mathematiker Jean-Yves Welschinger, der heute an der Université de Lyon arbeitet, einen Trick zur Berechnung der nach ihm benannten Welschinger-Invarianten W_d. Diese bestimmt jedoch nicht alle reellen Kurven d-ten Grades, die durch $3d - 1$ Punkte verlaufen, sondern bloß ihre Mindestanzahl. Welschingers Ansatz besteht darin, alle Kurven mit einem Vorzeichen zu versehen, bevor er sie zählt. Dadurch tragen manche positiv und andere negativ zu der Anzahl bei. Er konnte zeigen, dass diese Summe W_d nicht mehr von der genauen Verteilung der Punkte im Raum abhängt.

Wie Punkte in der Ebene komplizierte Kurven festlegen

Maxim Kontsevichs Formel berechnet die Anzahl aller rationaler Kurven d-ten Grades, die durch $3d - 1$ willkürlich verteilte Punkte in einer Ebene verlaufen:

$$N_d = \sum N_a \cdot N_b \cdot [a^2 \cdot b^2 \cdot C(3d-4, 3a-2) - a^3 \cdot b \cdot C(3d-4, 3a-1)]$$

Die Summe $\sum$ läuft über alle positiven ganzen Zahlen a und b, welche die Gleichung $a + b = d$ erfüllen. $C(p, q)$ bezeichnet den Binomialkoeffizienten $p! / [q! (p-q)!]$, mit $p! = p \cdot (p-1) \cdot (p-2) \cdot \ldots \cdot 2 \cdot 1$.

Die Zahl N_d lässt sich also nur berechnen, wenn man N_a und N_b kennt. Glücklicherweise weiß man, wie groß N_1 und N_2 sind, so dass sich aus ihnen alle anderen N_d bestimmen lassen.

Es mag zunächst überraschend erscheinen, dass die obige Summe endlich bleibt, selbst wenn sie rapide wächst. Das liegt daran, dass $3d - 1$ Punkte einige rationale Kurven d-ten Grades vollständig bestimmen. Eine solche Kurve ist im Allgemeinen wie folgt parametrisiert:

$$x(t) = (a_0 + \ldots + a_d t^d)/(c_0 + \ldots + c_d t^d)$$

$$y(t) = (b_0 + \ldots + b_d t^d)/(c_0 + \ldots + c_d t^d)$$

Sie hängt von $3 \cdot (d + 1)$ Koeffizienten $a_0, \ldots, a_d, b_0, \ldots, b_d, c_0, \ldots, c_d$ ab.

Allerdings kann man den Zähler und Nenner beider Brüche durch eine Zahl teilen, beispielsweise c_d, ohne etwas an der Form der Kurve zu ändern. Das eliminiert einen Koeffizienten, so dass nur noch $3 \cdot (d + 1) - 1 = 3d + 2$ übrig sind.

Darüber hinaus kann man für komplexe rationale Kurven den Parameter t durch einen Bruch $(g \cdot t + h)/(u \cdot t + w)$ ersetzen. Diese zusätzliche Symmetrie reduziert die Anzahl der benötigten Koeffizienten um weitere drei. Eine rationale Kurve d-ten Grades hängt also bloß von $(3d + 2) - 3 = 3d - 1$ Parametern ab.

Falls eine solche Kurve $3d - 1$ Punkte in der Ebene durchquert, kann sie von keinem weiteren Wert mehr abhängen – solange die Punkte »in allgemeiner Lage« sind, das heißt, dass jeder Einzelne von ihnen die Freiheitsgrade einer Kurve um eins reduziert.

Indem Mathematiker die Koordinaten der Punkte in die Parametrisierung einsetzen, können sie das so entstehende riesige Gleichungssystem lösen, um die Koeffizienten $a_0, \ldots, a_d, b_0, \ldots, b_d, c_0, \ldots, c_d$ zu berechnen. Das System hat N_d Lösungen, deren Anzahl sich mit der Formel von Kontsevich bestimmen lässt.

Es fehlte aber eine einfache Methode wie Kontsevichs Formel, um Welschinger-Invarianten zu berechnen. Hier kommt die tropische Geometrie ins Spiel und liefert eines der ersten Beispiele, in dem das junge Forschungsgebiet zu neuen mathematischen Erkenntnissen geführt hat. 2009 fanden Ilia Itenberg von der Universität Paris-Sorbonne, Viatcheslav Kharlamov von der Universität Straßburg und Eugenii Shustin von der Universität Tel Aviv mit Hilfe der tropischen Geometrie eine Formel, die Welschinger-Invarianten ausspuckt. Aus ihr folgt beispielsweise, dass $W_1 = 1$, $W_2 = 1$, $W_3 = 8$ und $W_4 = 240$ ist. Wenn es also $N_3 = 12$ komplexe Kurven dritten Grades gibt, die durch acht Punkte in der Ebene verlaufen, sind mindestens $W_3 = 8$ davon reell. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Vorzeichen bedeutet das: Es gibt je nach Verteilung der acht Punkte im Raum entweder acht (alle haben das gleiche Vorzeichen), zehn (eine hat ein anderes Vorzeichen als die neun übrigen) oder zwölf (zwei Kurven haben ein negatives und zehn ein positives Vorzeichen) reelle Kurven gibt, die sie passieren.

Die tropische Geometrie half im August 2018 auch David Jensen von der University of Kentucky und Sam Payne von der Yale University dabei, eine bisher unbekannte Eigenschaft algebraischer Kurven zu enthüllen. Da diese Kurven eigentlich zweidimensionale Objekte sind, können sie Löcher haben, über die sie häufig klassifiziert werden. Jensen und Payne fanden heraus, dass solche mit 22 und 23 Löchern von »allgemeinem Typ« sind, was unter anderem bedeutet, dass es unmöglich ist, jede dieser Kurven durch rationale Funktionen zu beschreiben.

Insgesamt hat die tropische Geometrie zu wichtigen Fortschritten in unterschiedlichen mathematischen Bereichen geführt. Sogar in der Physik könnte sie ein jahrzehntealtes Rätsel lösen (siehe »Der tropische Spiegel« auf S. 18). Es wundert noch immer viele Wissenschaftler, dass sich der brandneue Forschungszweig als so effizient erweist. Sein Vorteil besteht darin, dass er viele komplizierte Probleme zu rein kombinatorischen Fragen vereinfacht, die ein Computer beantworten kann. ◂

QUELLEN

Gathmann, A., Markwig, H.: The Caporaso-Harris formula and plane relative Gromov-Witten invariants in tropical geometry. Mathematische Annalen 338, 2007

Itenberg, I. et al.: A Caporaso-Harris type formula for Welschinger invariants of real toric Del Pezzo surfaces. Commentarii Mathematici Helvetici 84, 2009

Kontsevich, M.: Enumeration of rational curves via torus actions. ArXiv hep-th/9405035, 1994

WEBTIPP

Rau, J.: A first expedition to tropical geometry. https://bit.ly/2o6Bzn2, 2017

Eine einfach gehaltene, englischsprachige Einführung in die tropische Geometrie, die sich an Anfänger richtet

SPIEGELSYMMETRIE
DER TROPISCHE SPIEGEL

Ein rätselhafter Zusammenhang zwischen völlig unterschiedlichen geometrischen Objekten verwundert Stringtheoretiker und Mathematiker. Kann die tropische Geometrie das Geheimnis lüften?



Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei **Spektrum** der Wissenschaft.

spektrum.de/artikel/1640008

Im Mai 1991 ahnten die Besucher einer Konferenz des »Mathematical Sciences Research Institute« in Kalifornien nicht, dass sie eine große Überraschung erwartete. Der britische Stringtheoretiker Philip Candelas, damals an der University of Texas in Austin, präsentierte dort seine Forschungsergebnisse, doch die größtenteils aus Mathematikern bestehenden Zuhörer zweifelten die Richtigkeit dieser Arbeit an.

Der Physiker behauptete, eine Formel gefunden zu haben, die »rationale Kurven« auf einer extrem komplizierten sechsdimensionalen »Oberfläche« zählt. Mathematiker konnten bisher bloß Kurven ersten, zweiten und dritten Grades mit aufwändiger Computerunterstützung auf den seltsamen Gebilden zählen (siehe »Das Skelett der Amöbe«, S. 12). Außerdem hatten sie kein Muster hinter diesen schnell anwachsenden Zahlen erwartet – geschweige denn, dass sich eine Formel zu ihrer Berechnung finden ließe.

Während des Vortrags fiel einigen Zuhörern auf: Candelas Wert für die Anzahl der Kurven dritten Grades unterschied sich von dem bereits bekannten Ergebnis der norwegischen Mathematiker Stein Arild Strømme, damals an der University of Utah, und Geir Ellingsrud, damals an der Universität Bergen. »Die algebraischen Geometer [im Publikum] zeigten sich arrogant, sie nahmen an, dass die Physiker einen Fehler gemacht hatten«, schreibt der Organisator der Konferenz und Fields-Medaillenträger Shing-Tung Yau in seinem Buch »The Shape of Inner Space«. Während Candelas und seine Kollegen daraufhin fieberhaft nach einem Fehler suchten, entdeckten Strømme und Ellingsrud etwa einen Monat später Ungereimtheiten in ihrem Programmcode – und gaben öffentlich bekannt, dass die Physiker richtiglagen.

Das Ergebnis von Candelas und seinen Kollegen hatte enorme Auswirkungen, die über das bloße Zählen von Kurven hinausgeht: Es deutete auf eine fundamentale Verbindung zwischen zwei völlig unterschiedlichen geometrischen Gebieten hin. Eine solche Übereinstimmung hatte niemand erwartet – und sie gibt Wissenschaftlern bis heute zahlreiche Rätsel auf. Inzwischen haben einige Mathematiker herausgefunden, dass die tropische Geometrie die ungeahnten Gemeinsamkeiten beider geometrischer Welten erklärt.

Der bizarre Zusammenhang fiel erstmals Stringtheoretikern in den 1980er Jahren auf. Die Stringtheorie soll die Gravitation mit den quantenmechanischen Gesetzen subatomarer Teilchen vereinigen, indem sie winzige Fädchen (»Strings«) definiert, die durch ihre Schwingungen die uns bekannten Elementarteilchen und fundamentalen Kräfte erzeugen.

Ungeachtet ihrer unterschiedlichen Struktur scheinen völlig verschiedene geometrische Figuren durch eine »Spiegelsymmetrie« verbunden.



IVANMOLLOV / GETTY IMAGES / ISTOCK

Allerdings funktioniert die spekulative Theorie nur, wenn die Welt, die sie beschreibt, neun Raumdimensionen besitzt. Das widerspricht unserem Verständnis des Universums, in dem wir nur drei wahrnehmen. Ein Ausweg besteht darin, anzunehmen, dass die überschüssigen Dimensionen an jedem Punkt unserer Raumzeit ganz klein aufgerollt (kompaktifiziert) sind, so dass wir sie nicht bemerken. Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, zu welcher sechsdimensionalen Form, einer so genannten Mannigfaltigkeit, sie kompaktifiziert sein könnten. Je nachdem, ob die Strings in einer sechsdimensionalen »Kugeloberfläche« oder einem »Donut« hin- und herschwingen, ergeben sich daraus völlig andere physikalische Gesetze.

Stringtheoretiker gehen davon aus, dass sich unsere Welt bloß reproduzieren lässt, wenn die überschüssigen Dimensionen auf ganz bestimmte Weise aufgerollt sind: zu so genannten Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten. Allerdings gibt es unendlich viele davon, die sich zum Teil stark voneinander unterscheiden. Herauszufinden, welche dieser ungewöhnlichen sechsdimensionalen »Oberflächen« unsere Naturgesetze passend beschreibt, gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Stringtheorie. Denn die extrem komplizierten geometrischen Gebilde bereiten selbst Mathematikern Kopfschmerzen.

AUF EINEN BLICK
DAS UNGLEICHE SPIEGELBILD

1. Stringtheoretiker fanden in den 1980er Jahren heraus, dass zwei völlig unterschiedliche geometrische Objekte miteinander zusammenhängen.

2. Noch heute versuchen Mathematiker herauszufinden, was hinter dieser unerwarteten »Spiegelsymmetrie« steckt.

3. Inzwischen sind immer mehr Forscher davon überzeugt, dass die tropische Geometrie die mysteriöse Übereinstimmung erklärt.

Verschiedene Versionen unserer Welt

Die Situation ist allerdings noch verzwickter: Es gibt nicht nur eine Art von Stringtheorie, die unsere Welt beschreiben könnte, sondern sogar fünf, die sich durch ihre Symmetrien unterscheiden. Zunächst schienen die verschiedenen Versionen nichts miteinander zu tun zu haben. Doch als Ende der 1980er Jahre der Physiker Wolfgang Lerche, damals am California Institute of Technology in Pasadena, mit seinen Kollegen die »Typ-IIA«-Stringtheorie mit einer bestimmten Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit studierte, stellte er fest, dass die »Typ-IIB«-Stringtheorie für eine vollkommen andere Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit die gleichen Resultate lieferte. Die Physiker konnten ihren Augen kaum trauen. Sie spielten das Szenario für verschiedene Kompaktifizierungen durch und stießen immer wieder auf das gleiche Ergebnis. Offenbar haben die auf den ersten Blick grundverschiedenen geometrischen Gebilde mehr Gemeinsamkeiten als gedacht.


IVANMOLLOV / GETTY IMAGES / ISTOCK

Diese mysteriöse Entdeckung nannten die Physiker fortan Spiegelsymmetrie, da sie jeder Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit X einen »Spiegel« Y zuordnet. Das überraschende dabei ist, dass sich X und Y kein bisschen ähneln: Selbst wenn man die extrem grobe Einordnung von Topologen nutzt, die Figuren unabhängig ihrer genauen Form bloß nach der Anzahl ihrer Löcher kategorisieren (für sie sind ein Donut und eine Tasse identisch), unterscheiden sich die Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten drastisch. Zum Beispiel könnte X zwei Löcher haben, während Y kein einziges besitzt. Dass beide Objekte zu der gleichen Physik führen, ist, als würde man einen Fußballspieler beobachten, der mit einem Ball genauso gut herumhantiert wie mit einem viereckigen Betonklotz.

Für Physiker war diese Übereinstimmung von Anfang an ein Segen. Denn einige hochkomplizierte Probleme der Typ-IIA-Stringtheorie fallen im Spiegel deutlich einfacher aus – und machen eine Berechnung oft überhaupt erst möglich. Das äußert sich insbesondere in einem vereinfachten Modell der Stringtheorie, der so genannten topologischen Stringtheorie. Physiker ziehen sie heran, um sonst unergründliche Eigenschaften der vollständigen Theorie zu untersuchen. Denn auch wenn die vereinfachte Variante nicht unsere echte Welt widerspiegelt, teilt sie dennoch einige Merkmale mit der gewöhnlichen Stringtheorie.

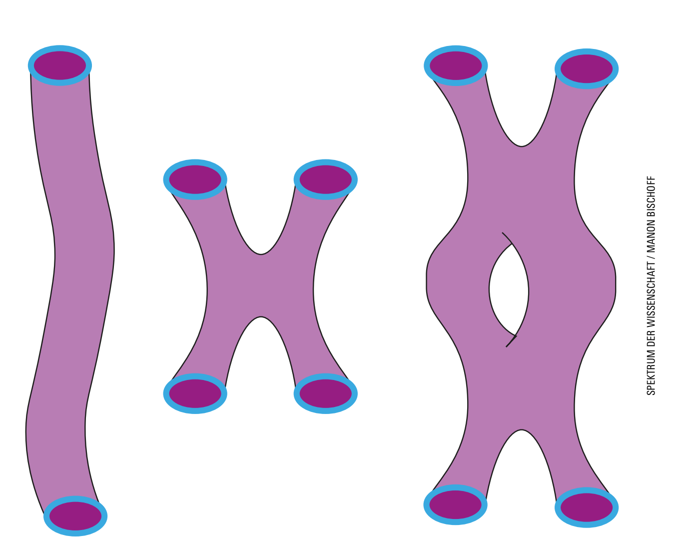
Statt fünf gibt es nur zwei verschiedene Versionen der topologischen Stringtheorie – das A- und das B-Modell. Glücklicherweise existiert auch im vereinfachten Modell eine Spiegelsymmetrie: Zu jedem A-Modell mit einer Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit X gibt es ein dazu äquivalentes B-Modell mit einer anderen Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit Y.

Diese Eigenschaft hatten sich Candelas und seine Kollegen zu Nutze gemacht, als sie die Bewegungen von »geschlossenen« Strings (deren Enden sich zu einem Ring verbinden) im A-Modell untersuchten. Die möglichen Schwingungen der winzigen Fäden zu verstehen, ist für Stringtheoretiker essenziell, da aus ihnen alle beobachtbaren physikalischen Phänomene folgen. Allerdings sind die Berechnungen auf der A-Seite extrem schwierig: Ein quantenmechanisches Teilchen wie ein String bewegt sich nicht geradewegs von einem Punkt zum nächsten. Stattdessen müssen Physiker alle möglichen Pfade berücksichtigen, die es gehen könnte, und die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für jeden dieser Wege in einer unendlichen Summe aufaddieren. Bis auf einzelne Ausnahmen lässt sich eine solche Berechnung auf der A-Seite überhaupt nicht bewerkstelligen.

Doch die Spiegelsymmetrie bot den Physikern einen Ausweg. Anstatt sich mit diesem komplizierten Problem herumzuschlagen, verlagerten sie ihre Berechnungen auf die B-Seite. Dort fallen die quantenmechanischen Korrekturen für die Bewegungen geschlossener Strings überraschenderweise weg: Ihre Schwingungen lassen sich durch rein geometrische Überlegungen ermitteln.

Dieses Ergebnis präsentierten Candelas und seine Kollegen 1991 auf der eingangs erwähnten mathematischen Konferenz. Denn die Bewegungen von geschlossenen Strings hinterlassen schlauchartige Spuren in der Raumzeit (siehe Bild unten), die jenen rationalen Kurven entsprechen, an denen Geometer schon so lange interessiert sind. Seit der Erforschung von Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten fragten sie sich, wie viele rationale Kurven auf diesen seltsamen Gebilden Platz finden. In die Sprache der Stringtheorie übersetzt lautet diese Frage: Wie viele Möglichkeiten haben geschlossene Strings, sich in einer Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit zu bewegen? Genau das konnten Candelas und seine Kollegen mit Hilfe der Spiegelsymmetrie beantworten.

Geschlossene Strings (blaue Kreise) hinterlassen während ihrer Bewegung durch die Raumzeit schlauchförmige Spuren (lila), die rationalen Kurven entsprechen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Wenn die Spiegelsymmetrie es aber ermöglicht, Kurven auf Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten zu zählen, könnte man sie vielleicht auch ganz allgemein als mathematisches Werkzeug in der enumerativen Geometrie nutzen. Dieser Hoffnung folgend stürzten sich immer mehr Mathematiker auf die Spiegelsymmetrie, um sie besser zu verstehen.

Denn hinter der Spiegelsymmetrie schien ein bisher unbekannter Mechanismus zu stecken, der zwei unterschiedliche mathematische Bereiche verbindet: die so genannte symplektische Geometrie, durch die das A-Modell definiert ist, und die dem B-Modell zu Grunde liegende algebraische Geometrie. Beide Konzepte weichen dabei nicht zwingend durch die äußere Erscheinung der Objekte, die sie beschreiben, voneinander ab, sondern durch deren innere Struktur. Es ist, als würde man verschiedene Baustoffe vergleichen.

Zwei unterschiedliche Baustoffe erweisen sich als gleich

Die algebraische Geometrie ist recht steif. Verändert man beispielsweise die Form einer algebraischen Kurve ganz leicht, dann lässt sie sich möglicherweise nicht mehr durch eine polynomiale Gleichung beschreiben – und ist dadurch nicht mehr algebraisch.

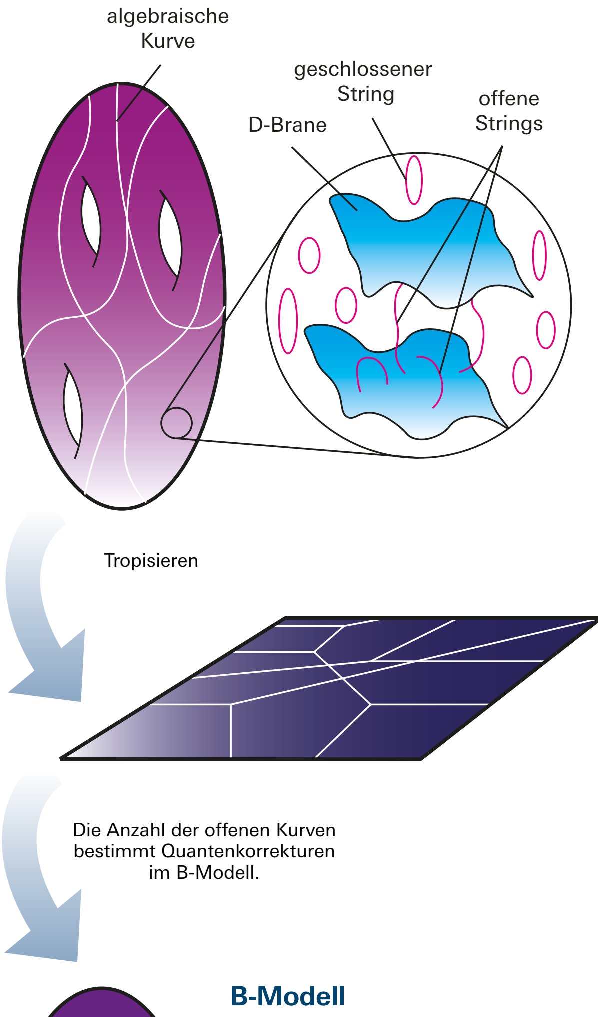
Die symplektische Geometrie ist dagegen viel flexibler. Zupft man an einer Ecke einer symplektischen Kurve, dann ist sie danach immer noch symplektisch. Dieser Teilbereich der Geometrie entstand aus der klassischen Mechanik. Um beispielsweise einen fliegenden Ball zu beschreiben, ist es wichtig, nicht nur seinen Ort zu jeder Zeit, sondern auch die dazugehörige Geschwindigkeit zu kennen. Aus diesen beiden Größen konstruieren Physiker einen so genannten Phasenraum. Jeder Punkt darin repräsentiert Ort und Geschwindigkeit zu einer bestimmten Zeit. Das unterscheidet sich drastisch von der algebraischen Geometrie, in der eine Figur der Lösung einer komplexen polynomialen Gleichung entspricht.

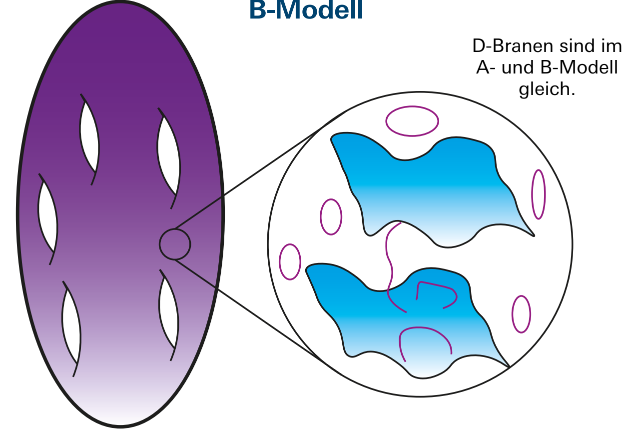
Was ist es also, das diese so unterschiedlich erscheinenden Konzepte verbindet? Tatsächlich lüftet die Stringtheorie das Geheimnis. Denn die symplektische Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit und ihr Spiegel teilen eine gemeinsame Komponente, die mit offenen Strings zusammenhängt. Anders als die geschlossenen Fäden, die Candelas mit seinen Kollegen erforschte, flattern die Enden offener Strings nicht lose im Raum herum, sondern haften an seltsamen Gebilden, so genannten D-Branen. Man kann sich Letztere vereinfacht als Flächen vorstellen, auch wenn sie im Allgemeinen mehr als zwei Dimensionen haben können.

1996 hatten Andrew Strominger, damals an der University of California in Santa Barbara, Shing-Tung Yau von der Harvard University und Eric Zaslow, damals ebenfalls an der Harvard University, erkannt, dass die Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit im B-Modell mit den D-Branen des A-Modells zusammenhängt. Genauer gesagt erzeugen alle D-Branen der A-Seite einen Raum, in dem jeder Punkt einer solchen Brane entspricht. Dieser Raum lässt sich als komplexe Mannigfaltigkeit darstellen, die der gesuchten Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit der B-Seite entspricht.

Weil die offenen Strings aus dem A-Modell an den D-Branen hin- und herschwingen, entstehen dabei aller-

Um den Spiegel einer symplektischen Mannigfaltigkeit (oben links) zu berechnen, muss man zunächst das A-Modell samt aller Spuren offener und geschlossener Strings tropisieren, so dass eine dreidimensionale Struktur mit gebietsweise linearen Kurven entsteht (Mitte, hier in 2-D dargestellt). Die Anzahl aller offenen tropischen Kurven entspricht dabei den Quanteneffekten, die offene Strings auf der Mannigfaltigkeit des B-Modells (unten links) hinterlassen und eine Konstruktion dieser so schwer machen.





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

dings komplizierte Vibrationen, die sich auf die komplexe Geometrie der B-Seite auswirken. Das stellt Wissenschaftler vor eine große Herausforderung, denn solche Quanteneffekte lassen sich nicht ohne Weiteres berechnen.

Auf der Suche nach einer Lösung dieses Problems stießen Bernd Siebert, damals an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und der Universität Hamburg, heute an der University of Austin, und Mark Gross, früher an der University of California San Diego und inzwischen am King's College in Cambridge, 2007 auf die tropische Geometrie.

Genau wie Kurven lassen sich auch Flächen oder höherdimensionale Mannigfaltigkeiten tropisieren. Dazu ersetzt man die komplexen Koordinaten durch die Logarithmen ihrer Beträge und betrachtet die neue Struktur für den Grenzfall, dass die Basis des Logarithmus gegen unendlich geht. Auf diese Weise wird aus der sechsdimensionalen symplektischen Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit des A-Modells eine dreidimensionale reelle »Oberfläche«.

Tropische Spuren von Strings

Neben der Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit der A-Seite »tropisierten« Siebert und Gross auch alle möglichen darauf verlaufenden rationalen Kurven, die den Bewegungen offener und geschlossener Strings entsprechen. Auf der dreidimensionalen reellen Oberfläche (der ehemaligen Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit) sehen die tropischen Kurven ganz ähnlich aus wie die gebietsweise linearen Strukturen in der reellen Ebene (siehe »Das Skelett der Amöbe«, S. 12). Je nachdem, wie sie sich auf der dreidimensionalen Struktur zusammensetzen, können dabei offene oder geschlossene tropische Kurven entstehen.

Gross und Siebert erkannten, dass sie aus den offenen tropischen Kurven die komplexe B-Seite herleiten können. Denn die Anzahl offener Kurven bestimmt, wie sich die Schwingungen offener Strings auf die Geometrie des B-Modells auswirken. Mit diesen quantenmechanischen Korrekturen haben die beiden Mathematiker schließlich den Spiegel einer symplektischen Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit konstruiert (siehe Bild links).

Das bringt Siebert seinem Ziel einen Schritt näher: die Spiegelsymmetrie als mathematisches Werkzeug zu etablieren, wie es Physiker für einige Spezialfälle schon seit über 25 Jahren nutzen. Die tropische Geometrie scheint dabei der fehlende Baustein zu sein, nach dem viele Mathematiker so lange gesucht haben. Sie bildet die Brücke in der Geometrie, wo niemand zuvor eine Verbindung erwartet hatte. ◂

QUELLEN

Abromovich, D. et al.: Decomposition of degenerate Gromov-Witten invariants. ArXiv 1709.09864, 2017

Siebert, B., Gross, M.: From real affine geometry to complex geometry. Annals of Mathematics 174, 2011

LITERATURTIPP

Gross, M.: Tropical geometry and mirror symmetry. American Mathematical Society, 2008

Der Mathematiker Mark Gross fasst die Vorträge einer Konferenz über tropische Geometrie und Spiegelsymmetrie zusammen.



Bäume wachsen nicht nur nach oben, sondern verstärken über das Dickenwachstum auch den Umfang von Spross und Wurzeln, wie diese Buche eindrücklich zeigt.

SMILEUS / GETTY IMAGES / ISTOCK

BOTANIK

SO WERDEN PFLANZENTRIEBE DICKER

Stammzellen im Kambium von Wurzeln bilden Gefäßgewebe für den Transport von Wasser und Nährstoffen. Ein fein austariertes molekulares System kontrolliert diese Zellen.

Ein ausgeklügeltes Gefäßsystem ermöglicht es Pflanzen, Wasser und Nährstoffe bis in die letzten Spitzen zu transportieren. Das erlaubte ihnen, in der Evolution nicht nur das Festland zu erobern, sondern auch an Statur, Umfang und Komplexität erheblich zu wachsen.

Die Zellen, aus denen später das Gefäßgewebe hervorgeht, werden bereits im Embryo angelegt. Bei vielen bedecktsamigen Pflanzen vermehren sie sich später stark und vergrößern so den Umfang von Wurzel und Spross. Dieses Dickenwachstum beruht auf der Teilung von Stammzellen im so genannten Kambium. Diese zylindrische Zellschicht treibt das Wachstum von zwei Kompartimenten voran: Innen liegt gewöhnlich das Xylem, das die Wasserleitungsbahnen beinhaltet und das Holz bildet; das äußere Phloem, auch als Bast bezeichnet, sorgt dagegen für den Nährstofftransport.

Mehr als die Hälfte der irdischen Biomasse besteht aus holzigem Pflanzenmaterial. Trotzdem wissen wir über dessen Ursprung, das Kambium, noch recht wenig. Da die Region im Innern der Pflanze verborgen liegt, ist sie schwerer zugänglich als etwa die Stammzellen in Wurzel- und Sprossspitzen. Jetzt haben zwei Arbeitsgruppen aus Finnland die Entwicklung des Kambiums an Wurzeln der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*, einem beliebten Modellorganismus der Botaniker, genauer untersucht.

Kontrolliert durch Pflanzenhormone

Um die Mechanismen in den Stammzellen aufzuklären, aus denen später das Kambium der Wurzelspitzen entsteht, arbeitete das Team um den Molekularbiologen Ykä Helariutta von der Universität Helsinki mit mutierten Pflanzen und verfolgte die Prozesse mittels fluoreszenzmarkierter Proteine. Dabei offenbarte sich ein komplexes molekulares Netzwerk aus Pflanzenhormonen, Transkriptionsfaktorproteinen sowie microRNA, das die Vorläuferzellen des Kambiums, die Prokambiumzellen, steuert.

Vor Beginn des Dickenwachstums übernehmen bestimmte Phloemzellen am Rand des Gefäßgewebes – Protophloem-Siebelement-Vorläufer genannt – die Rolle eines Organisators. Aktiviert durch das Hormon Zytokinin, stellen diese Zellen Transkriptionsfaktoren her, welche die Forscher PEAR-Proteine nennen (siehe »Entwicklung des Kambiums«, rechts). Diese Proteine fanden die Wissenschaftler auch in benachbarten Prokambiumzellen, wohin sie vermutlich aus den Protophloem-Siebelement-Vorläufern gelangten.

PEAR-Proteine regen Zellen zur Teilung an. Das geschieht jedoch nur am Außenrand des Gefäßgewebes, da diese Transkriptionsfaktoren im Wurzelinneren zusammen mit dem Pflanzenhormon Auxin die Bildung von weiteren Transkriptionsfaktoren namens HD-ZIP-III initiieren. Diese hemmen wiederum die PEAR-Proteine und

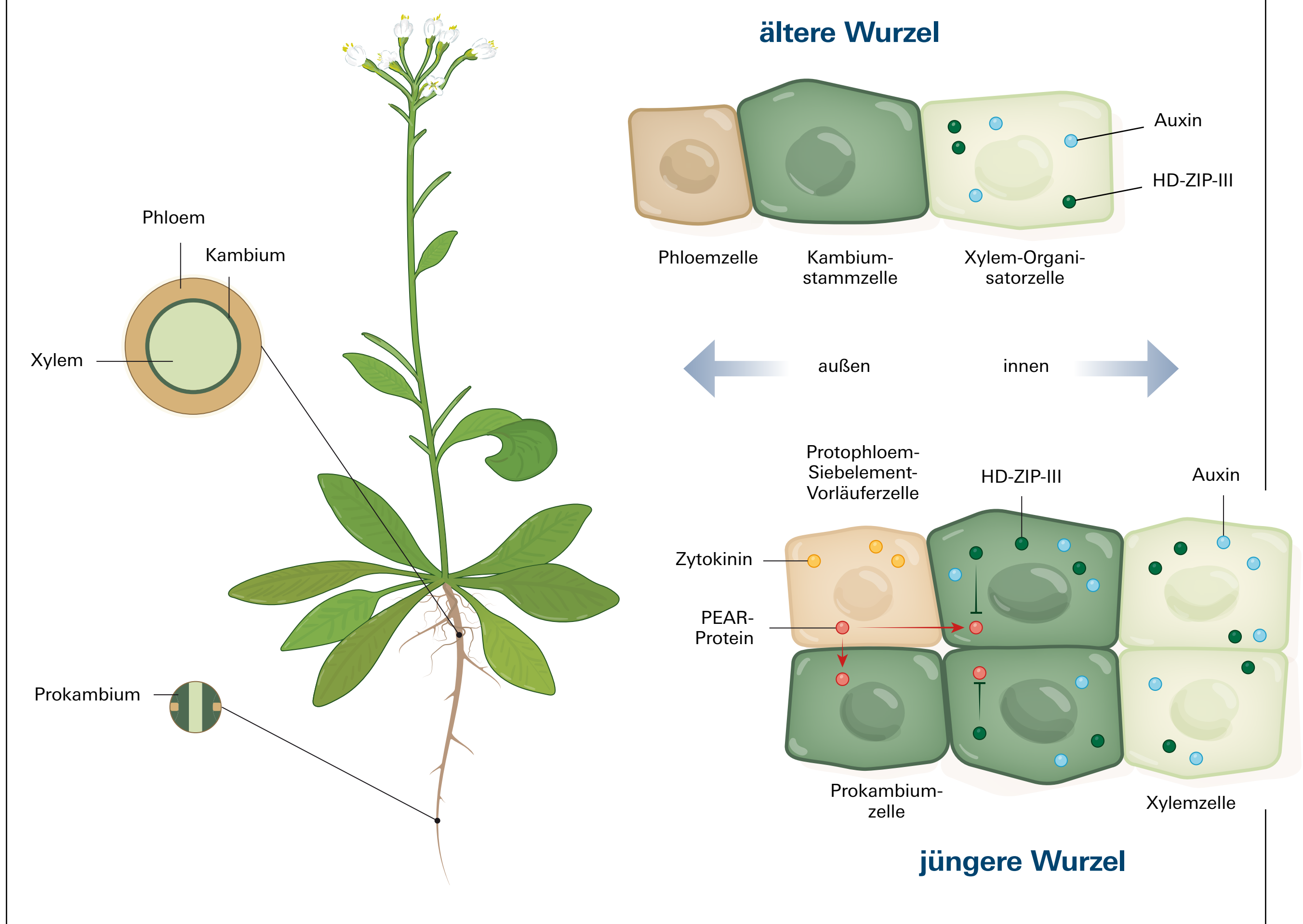
Entwicklung des Kambiums

Im Spross sowie in den Wurzeln von Blütenpflanzen sitzen im so genannten Kambium Stammzellen, die sich nach innen zum Xylem und nach außen zum Phloem entwickeln. Während Ersteres für den Wassertransport von unten nach oben sorgt, findet im Letzteren der Nährstofftransport in umgekehrter Richtung statt. Durch die Teilung der Stammzellen verdicken sich Spross und Wurzel.

Die molekularen Prozesse, die dieses Dickenwachstum steuern, analysierten zwei finnische Arbeitsgruppen im Wurzelkambium der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*. Während sich die Forscher um Ykä Helariutta auf die Vorgänge im Prokambium junger Wurzeln konzentrierten, untersuchte das Team um Ari Pekka Mähönen, wie die Stammzellen im Kambium älterer Wurzeln entstehen.

In jungen Wurzeln sitzt ein Zelltyp namens Protophloem-Siebelement-Vorläufer, der eine hohe Konzentration des Pflanzenhormons Zytokinin aufweist (rechts unten). Die Zellen produzieren PEAR-Proteine genannte Transkriptionsfaktoren, die in angrenzende Prokambiumzellen gelangen (rote Pfeile) und diese zur Teilung anregen. In weiter innen, Richtung Xylem liegenden Prokambiumzellen kurbelt jedoch das Hormon Auxin zusammen mit PEAR-Proteinen die Produktion von Transkriptionsfaktoren namens HD-ZIP-III an, die wiederum die PEAR-Proteine und damit die Zellteilung hemmen. Durch diese Rückkopplungsschleife bleibt die Zellteilung auf einen engen Raum begrenzt, und die Wurzel verdickt sich nach außen.

Im Kambium älterer Wurzeln werden Stammzellen durch benachbarte Organisatorzellen im Xylem kontrolliert (rechts oben). In diesen Zellen herrschen hohe Konzentrationen an Auxin und HD-ZIP-III, weshalb sie sich nicht teilen, sondern in einem Überdauerungsstadium verharren. Dagegen behalten die Kambiumstammzellen ihre Teilungsfähigkeit und können sich sowohl zum Xylem als auch zum Phloem differenzieren.



damit die Zellteilung. Aus der Kombination von mobilen und stationären Komponenten entsteht somit ein dynamisches, aber räumlich feststehendes Muster, das die Zellvermehrung beim Aufbau des Kambiums kontrolliert und letztlich zum Dickenwachstum führt.

Die Arbeitsgruppe um Ari Pekka Mähönen, der ebenfalls als Molekularbiologe an der Universität Helsinki forscht, konzentrierte sich auf spätere Stadien der Wurzelverdickung. Durch genetische Markierung entdeckten die Forscher, dass nur direkt an das Xylem angrenzende Kambiumzellen sich zu Stammzellen entwickeln. Benachbarte Xylemzellen fungieren hier als Organisator, indem sie Signale an die Kambiumzellen senden. Die sich teilenden Stammzellen differenzieren sich dann nach innen zum Xylem und nach außen zum Phloem.

Ein 150 Jahre altes Rätsel

Die Organisatorrolle spielen diese Xylemzellen nur zeitweise, bevor andere von den kambialen Stammzellen erzeugte Xylemvorläuferzellen, diese Funktion übernehmen. Der Schlüssel hierfür liegt wiederum im Hormon Auxin, das sich in den Organisatorzellen anreichert und damit die Herstellung der Transkriptionsfaktoren HD-ZIP-III fördert. Diese unterbinden die Teilung der Zellen, die dadurch in einem typischen Überdauerungsstadium verharren, das als Quieszenz bezeichnet wird.

Im Kambium bilden sich somit Tochterzellgenerationen mit jeweils festgelegten Abstammungslinien, die sich entweder nach innen oder nach außen weiterentwickeln. Erstaunlicherweise scheint somit eine einzelne Kambiumstammzelle in der Lage zu sein, sowohl Xylem- als auch Phloemzellen hervorzubringen, obwohl das Verhältnis, in dem die Pflanze diese Gewebe jeweils produziert, von den Umweltbedingungen abhängt. Diese Frage war unter Botanikern seit fast 150 Jahren umstritten. Damit unterscheiden sich die Prozesse erheblich von den Vorgängen in den Wurzel- und Sprossspitzen: In den Wurzeltrieben bilden Stammzellen in der Regel nur in eine Richtung Tochterzellen eines bestimmten Typs aus. Die Stammzellen der Sprosstriebe erhalten ihre Bestimmung erst, nachdem sie die Spitzenregion verlassen haben.

Zukünftige Forschungen sollten aufdecken, welche Faktoren die Differenzierung zum Phloem oder zum Xylem bestimmen. Unklar ist ebenfalls, inwieweit die festgelegte Zelldifferenzierung und die Teilungsaktivität im sich entwickelnden Kambium voneinander abhängen. Wenn wir die zu Grunde liegenden Mechanismen besser verstehen, ließe sich eventuell die Produktion pflanzlicher Biomasse biotechnologisch steigern.

Die beiden Arbeitsgruppen hatten sich bei ihren Untersuchungen auf das Prokambium in der Wurzel konzentriert, das bereits im Pflanzenembryo angelegt ist. Dagegen entsteht das Kambium im Spross postembryonal aus Stammzellen an der Sprosstriebspitze. Spannend wäre es herauszufinden, ob ähnliche Moleküle die Entwicklung des Kambiums an diesen beiden unterschiedlichen Stellen der Pflanze vorantreiben. Sollten bei verholzten Pflanzenarten vergleichbare molekularbiologische Prozesse wie bei *Arabidopsis thaliana* ablaufen, wären die Schlüsselmoleküle dingfest gemacht, die das Dickenwachstum der Blütenpflanzen kontrollieren. Zudem könnten wir die viel diskutierte Frage klären, ob das Kraut *Arabidopsis thaliana* auch als Modellorganismus für Holzbildung taugt.

Sebastian Wolf ist promovierter Biologe und Nachwuchsgruppenleiter am Centre for Organismal Studies (COS) der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. **Jan Lohmann** ist Professor für Stammzellbiologie der Universität Heidelberg und leitet am COS die Abteilung für Stammzellbiologie.

QUELLEN

Miyashima, S. et al.: Mobile PEAR transcription factors integrate positional cues to prime cambial growth. Nature 565, 2019

Smetana, O. et al.: High levels of auxin signalling define the stem-cell organizer of the vascular cambium. Nature 565, 2019

FESTKÖRPER

SUBATOMARES TEMPOLIMIT

In einer seltsamen Klasse von Metallen geben Elektronen ihre Energie offenbar so schnell ab, wie es die Gesetze der Quantenmechanik erlauben. Forscher versuchen dieses Phänomen besser zu verstehen und hoffen damit, die letzten Geheimnisse der Supraleitung zu lüften.

Vor mehr als drei Jahrzehnten stellten Physiker fest, dass einige Metalle beim Abkühlen ein extrem ungewöhnliches Verhalten an den Tag legen: Ihre Elektronen stoßen innerhalb kürzester Zeit wie wild gegeneinander, so dass die Stoffe einen höheren elektrischen Widerstand haben als gewöhnliche Leiter. Das erstaunliche daran ist, dass diese so genannten »strange metals« unterhalb einer kritischen Temperatur plötzlich supraleitend werden.

Zu ihnen zählen unterschiedliche Materialien, die sich weder in ihrem Aufbau, ihrer Kristallstruktur oder ihren übrigen chemischen Eigenschaften ähneln. Im November 2018 hat das Team um Anaëlle Legros von der Université de Sherbrooke in Kanada das seltsame Verhalten der Elektronen auch in einer großen Gruppe von

keramischen Kristallen, so genannten Cupraten beobachtet. Frühere Studien, insbesondere eine Arbeit von Andrew Mackenzie von der University of St Andrews in Schottland und seinen Kollegen aus dem Jahr 2013, hatten bereits gezeigt, dass auch in anderen exotischen supraleitenden Verbindungen wie Strontiumruthenat, Pnictiden und Tetramethyltetrathiafulvalen Elektronen ihre Energie durch heftige Stöße offenbar schnellstmöglich in Wärme umwandeln.

Doch was genau die Teilchen dazu veranlasst, ist nicht bekannt. Experten gehen davon aus, dass Elektronen in dieser Metallart »maximal verschränkt« sind. Das heißt, dass die Eigenschaften jedes Teilchens von denen aller anderen abhängen. Dieser Zustand könnte es ihnen ermöglichen, ihre Energie durch Kollisionen so schnell zu verteilen, wie es die Gesetze der Quantenmechanik zulassen.

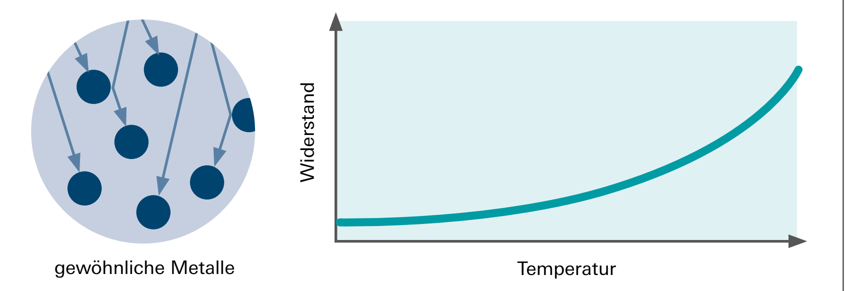
Das Prinzip der Verschränkung ist eines der bizarrsten quantenmechanischen Phänomene. Bereits 1930 hatte Albert Einstein erkannt, dass zwei Teilchen selbst über riesige Distanzen voneinander abhängen können. Bestimmt man die Eigenschaften eines der beiden, weiß man sofort in welchem Zustand sich das andere befindet. »In dieser Klasse von Metallen sind Millionen von Elektronen verschränkt, was zu einem neuen Aggregatzustand führt«, erklärt der theoretische Physiker Subir Sachdev von der Harvard University. Doch was sich auf mikroskopischer Ebene wirklich abspielt, ist noch ein Rätsel.

Maximal verschränkte Elektronen beobachteten Georg Bednorz und Alex Müller von IBM Research in Zürich erstmals 1986, doch ihr Fund ging im Schatten eines anderen Ereignisses unter. Die zwei Physiker hatten damals das erste Cuprat synthetisiert und kühlten es herunter, bis es bei minus 238 Grad Celsius widerstandsfrei Strom leitete. Theoretischen Modellen zufolge durften Supraleiter bei solchen vergleichsweise hohen Temperaturen aber nicht existieren. Für diese bahnbrechende Entdeckung wurden Bednorz und Müller bereits ein Jahr später mit dem Nobelpreis für Physik belohnt

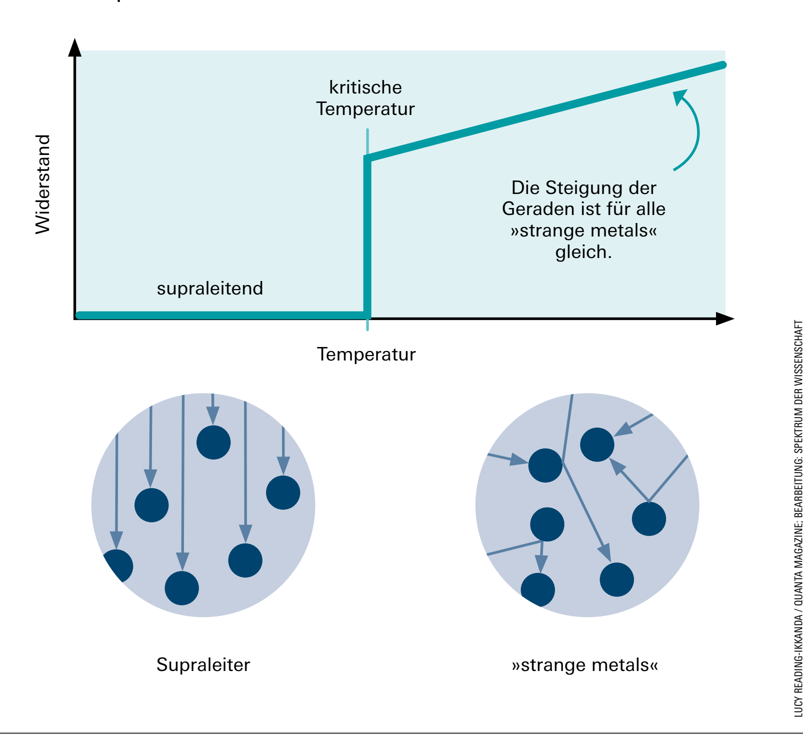
Seltsame Phänomene in seltsamen Metallen

Obwohl manche Metalle besonders schlechte Stromleiter sind, verwandeln sie sich unterhalb einer kritischen Temperatur in Supraleiter. Was die Elektronen in diesen beiden Phasen genau machen, ist noch unklar.

Gewöhnliche Metalle:
In gewöhnlichen Metallen wie Kupfer fließen die Elektronen unabhängig voneinander den Leiter entlang. Der elektrische Widerstand, der entsteht, wenn die Teilchen gegeneinander stoßen, wächst üblicherweise mit dem Quadrat der Temperatur an.



»strange metals«
Forscher nehmen an, dass Elektronen in diesen Metallen in einem extrem verschränkten Zustand sind. Ihr Widerstand hängt vom Wert des planckschen Wirkungsquantums ab, einer fundamentalen Größe in der Quantenmechanik. Daraus schließen Physiker, dass die Elektronen ihre Energie so schnell abgeben, wie es die Physik zulässt. Unterhalb einer kritischen Temperatur werden diese ungewöhnlichen Metalle zu perfekten Stromleitern ohne elektrischen Widerstand.



LUCY READING-IKKANDA / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

(siehe **Spektrum** Dezember 1987, S. 12). Zeitgleich brach weltweit eine fieberhafte Suche nach ähnlichen Materialien aus und schon bald entdeckten Forscher andere Verbindungen, die bei noch höheren Temperaturen widerstandsfrei Strom leiten. Seitdem träumen Physiker davon, Stoffe zu finden, die selbst bei Raumtemperatur supraleitend sind.

Rätselhafte Supraleiter bei hohen Temperaturen

Das Geheimnis von Supraleitern ist, dass ihre Elektronen Paare bilden, die sich organisiert fortbewegen, ohne zu kollidieren. Bei hohen Temperaturen bricht die Verbindung der Teilchen allerdings auf, so dass sie nicht mehr verlustfrei fließen. Um Kristalle zu synthetisieren, die bei hohen Temperaturen supraleitend bleiben, müssen Physiker gewissermaßen den Klebstoff zwischen den Elektronen stärken. Leider weiß aber bis heute niemand, was dieser Klebstoff ist. Es gab schon etliche Erklärungsversuche, doch die erstaunliche Komplexität von Cupraten und ähnlichen Verbindungen vereitelten jede Bemühung.

Daher rückte in den folgenden Jahren eine anfangs kaum wahrgenommene Beobachtung von Bednorz und Müller wieder in den Fokus. In ihrem Experiment hatten die beiden Physiker nicht bloß den ersten Hochtemperatursupraleiter entdeckt, sondern auch das erste Metall mit den eigentümlichen Transporteigenschaften. Während sie das Cuprat aus Lanthan-, Barium-, Kupfer- und Sauerstoffatomen abkühlten, bemerkten sie, dass der elektrische Widerstand des Kristalls mit fallender Temperatur linear abnahm. Bei herkömmlichen Materialien bildet die Beziehung zwischen Temperatur und Widerstand eine komplizierte Kurve, die schneller abfällt.

Wie sich herausstellte, ist dieses Cuprat keine Ausnahme. Der mysteriöse lineare Widerstand taucht in vielen anderen Materialien auf. Wie Supraleiter auch, zeigen sich die Eigenschaften der seltsamen Metallklasse nur bei niedrigen Temperaturen. Tatsächlich scheinen beide ungewöhnlichen Zustände zu konkurrieren: Als Forscher supraleitende Zustände in Cupraten durch ein starkes Magnetfeld zerstörten, wurden die Materialien zu diesen ungewöhnlichen Metallen. Ohne äußeres Magnetfeld scheint die Supraleitung unterhalb der kritischen Temperatur aber die Oberhand zu gewinnen. Physiker fragen sich daher, ob es eine Möglichkeit gibt, diesen Kipppunkt nach oben zu verschieben, so dass ein Material bei möglichst hohen Temperaturen widerstandsfrei Strom leitet. Doch dazu müssen sie erst den Mechanismus hinter der seltsamen Metallart verstehen.

In den 1990er Jahren fanden Forscher immer mehr Hinweise darauf, dass ein quantenmechanischer Effekt dahintersteckt. Damals untersuchte der Physiker Joseph Orenstein zusammen mit seinen Kollegen von den Bell Laboratories das Cuprat Yttriumbariumkupferoxid ($YBa_2Cu_3O_{6+x}$), dessen elektrischer Widerstand wie bei den Proben von Bednorz und Müller mit sinkender Temperatur linear abnahm.

Um das besser zu verstehen, bestimmten Orenstein und sein Team, wie häufig die Elektronen innerhalb einer bestimmten Zeitspanne zusammenstoßen. Es zeigte sich, dass diese »Streurate« ebenfalls linear mit der Temperatur abfällt. Besonders erstaunte die Forscher die Steigung der dabei entstehenden Geraden: Sie kommt dem Zahlenwert des planckschen Wirkungsquantums $\hbar$ auffallend nahe. Und das scheint kein Zufall zu sein.

Unerwartete Gerade

Insbesondere die Arbeiten von Anaëlle Legros und ihren Kollegen sowie von Andrew Mackenzies Team haben gezeigt, dass eine solche Gerade auch für andere Metalle mit dem erstaunlichen Wert von $\hbar$ abfällt. Offenbar handelt es sich hierbei um einen universellen quantenmechanischen Effekt, der nicht von den mikroskopischen Details eines Materials abhängt.

Der niederländische Theoretiker Jan Zaanen von der Universität Leiden gab diesem Phänomen 2004 einen Namen: plancksche Dissipation. Er erklärte die Erscheinung damit, dass Elektronen in exotischen Materiezuständen ein quantenmechanisches Tempolimit erreichen, das bestimmt, wie schnell sie ihre Energie durch Stöße in Wärme umwandeln können. Doch warum sollte es eine solche Begrenzung geben? Die bisher überzeugendste Erklärung beruht auf der Unschärferelation, die Werner Heisenberg 1927 entwickelt hat. Sie besagt, dass das Wissen über die Welt begrenzt ist – und zwar durch den Wert von $\hbar$.

Das plancksche Wirkungsquantum taucht in der gesamten Quantenmechanik auf. Dieser winzige Zahlenwert stellt die kleinste Wirkung dar, die es in der Natur gibt. Darüber hinaus ist $\hbar$, wie Heisenberg zeigte, auch die quantenmechanische Einheit der Unschärfe. Sie entsteht, wenn man versucht, zwei Dinge gleichzeitig zu messen, zum Beispiel den Ort und den Impuls eines Teilchens oder wie viel Energie es besitzt und wie lange. Je besser man die eine Größe kennt, desto weniger weiß man über die andere.

Wissenschaftler glauben, dass Elektronen in der ungewöhnlichen Metallklasse »ihre Energie so schnell abgeben, wie es die Unschärferelation zulässt«, erklärt Sean Hartnoll von der Stanford University. Um die Energie durch Stöße loszuwerden, brauchen Elektronen Zeit. Da Zeit und Energie aber wegen der Unschärferelation nur bis auf $\hbar$ genau definiert sind, kann dieser Prozess nicht beliebig schnell vonstattengehen.

Das sind bislang bloß theoretische Überlegungen. Physiker hoffen ihre Hypothese in Zukunft beweisen zu können und so zu erklären, warum Elektronen in solchen Metallen an ein Tempolimit stoßen. Weil in der ungewöhnlichen Metallklasse alle Elektronen miteinander verschränkt sind, ist es aber extrem schwierig, diesen Zustand theoretisch zu beschreiben.

Seit einigen Jahren verfolgen Hartnoll, Sachdev und ihre Kollegen dieses Ziel mit einem verblüffenden Ansatz. Es hat sich nämlich gezeigt, dass es auch für Schwarze Löcher ein Tempolimit gibt. Fällt Information beispielsweise in Form eines Teilchens in ein solches Ungetüm, wird sie innerhalb kürzester Zeit »verschlüsselt« und in Form von Strahlung wieder ausgespuckt. Die Geschwindigkeit,

mit der dieser Prozess stattfindet, bestimmt die Unschärferelation – in keinem anderen System passiert das schneller. Die Physiker untersuchen deshalb imaginäre Schwarze Löcher in einer höheren Dimension und hoffen, ihre Ergebnisse später wieder in die Quantenwelt übersetzen zu können.

Ob Schwarze Löcher das Verhalten von Elektronen in den ungewöhnlichen Metallen erklären können und die letzten Geheimnisse der Supraleitung lüften werden, ist noch unklar. Doch einige Forscher, darunter auch Hartnoll, sind überzeugt davon, dass ein baldiger Durchbruch in Sicht ist.

Natalie Wolchover ist Journalistin und Physikerin in New York. Sie schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

QUELLEN

Legros, A. et al.: Universal T-linear resistivity and Planckian dissipation in overdoped cuprates. Nature Physics 10.1038/s41567-018-0334-2, 2018

Mackenzie, A. et al.: Similarity of scattering rates in metals showing T-linear resistivity. Science 339, 2013

Zaanen, J.: Why the temperature is high. Nature 430, 2004

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Universal Quantum Phenomenon Found in Strange Metals« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



PHYSIK

QUANTENFRAKTALE

Teilchen in einer Raumdimension verhalten sich vollkommen anders als solche in einer Ebene. Doch was geschieht, wenn die Dimensionenzahl dazwischenliegt? Physiker haben erstmals die Wellenfunktionen von Elektronen untersucht, die in fraktalen Geometrien eingesperrt sind.

Die Anzahl der Raumdimensionen ist entscheidend für viele Vorgänge in der Natur. Eine Maus in einem engen Abflussrohr könnte beispielsweise einer ihr entgegenkommenden Katze kaum entgehen, während sie es auf einem freien Feld deutlich einfacher hätte. Vögel, die zudem die dritte Raumdimension nutzen, fällt es am leichtesten, einem hungrigen Jäger zu entkommen.

So ist es auch in der Physik. Das Verhalten von Elektronen hängt stark davon ab, ob sie sich in ein-, zwei- oder dreidimensionalen Materialien befinden. In zwei und drei Dimensionen können sich die negativ geladenen Teilchen einfach aus dem Weg gehen, ihre Bewegung erinnert an die einer Flüssigkeit. Doch in nur einer Dimension haben es Elektronen schwerer. Weil sie sich nicht weitläufig ausweichen können, beeinflussen die abstoßenden elektromagnetischen Kräfte sie deutlich stärker als in höheren Dimensionen. Das hat außergewöhnliche Folgen: Werden die Teilchen

Mandelbrot bemerkte, dass die britische Küstenlinie immer länger erscheint, je detailreicher die Karte ist. Gerade die Westküste ist extrem zerklüftet. Hat man bloß große Kreisscheiben zur Verfügung (oben), braucht man nur wenige von ihnen, um die Küste vollständig zu überdecken. Je kleiner die Radien der Scheiben, desto mehr sind nötig. Anders als für eine gerade Linie wächst ihre Anzahl aber nicht linear mit ihrem Radius an. Aus dieser Beobachtung lässt sich die Hausdorff-Dimension der britischen Westküste auf 1,25 berechnen.

0 75 150 km

beispielsweise in Schwingung versetzt, oszilliert ihr Spin plötzlich losgelöst von ihnen selbst. Es wirkt, als gäbe es »Spinwellen« und »Ladungswellen«, die sich unabhängig voneinander ausbreiten.

Inwiefern physikalische Phänomene von der Dimension eines Systems abhängen, haben Forscher schon ausgiebig untersucht. Dabei haben sie sich auf ganzzahlige Dimensionen beschränkt. Nun haben Physiker um Sander Kempkes von der Universität Utrecht erstmals die Wellenfunktionen von Elektronen in Kristallen erforscht, deren Dimension zwischen eins und zwei liegt. Sie hoffen, durch weitere Arbeiten auf noch unbekannte exotische Effekte zu stoßen.

Neben Punkten, Geraden oder Ebenen gibt es auch Objekte mit fraktalen Dimensionen. Intuitiv würde man sagen, dass eine Kurve immer eindimensional ist und eine ebene Fläche stets zweidimensional. Was wenn die Kurve aber so eng verläuft, dass sie die gesamte Fläche ausfüllt? Dieser Überlegung folgend führte der deutsche Mathematiker Felix Hausdorff 1918 einen neuen Dimensionsbegriff ein, der berücksichtigt, wie viel Raum eine Distanz zwischen zwei Punkten einnimmt.

Um eine gerade Linie der Länge $2r$ vollständig zu bedecken, braucht man entweder zwei Kreisscheiben mit Radius r oder vier Kreisscheiben mit Radius $r/2$.

Bei komplizierteren Kurven wächst die Scheibenanzahl dagegen nicht linear mit ihrem Radius an (siehe Bild auf S. 27). Mathematiker nutzen diese Eigenschaft, um die Hausdorff-Dimension eines Objekts zu bestimmen. Für gewöhnliche Strukturen wie Ebenen, Parabeln oder Würfel deckt sie sich mit dem herkömmlichen Dimensionsbegriff. Doch für Fraktale nimmt die Hausdorff-Dimension gebrochenzahlige Werte an.

Fraktale: Alles andere als selten

Mitte der 1970er Jahre stellte der in Polen geborene US-amerikanisch-französische Mathematiker Benoît Mandelbrot fest, dass Fraktale keineswegs eine mathematische Besonderheit sind. Tatsächlich tauchen sie überall in der Natur auf: »Wolken sind keine Kugeln, Berge sind keine Kegel, Küstenlinien sind keine Kreise, und Rinde ist nicht glatt, so wie auch der Blitz nicht auf einer Geraden unterwegs ist«, schreibt er in seinem 1982 erschienenen Buch »Die fraktale Geometrie der Natur«.

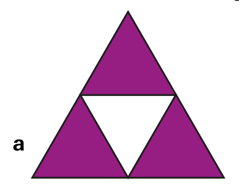
Wie verändern sich aber die Gesetze der Physik, wenn mikroskopische Teilchen in fraktalen Strukturen eingesperrt sind? Um dieser Frage nachzugehen, haben Kempkes und seine Kollegen die Wellenfunktionen von Elektronen in so genannten Sierpiński-Dreiecken untersucht.

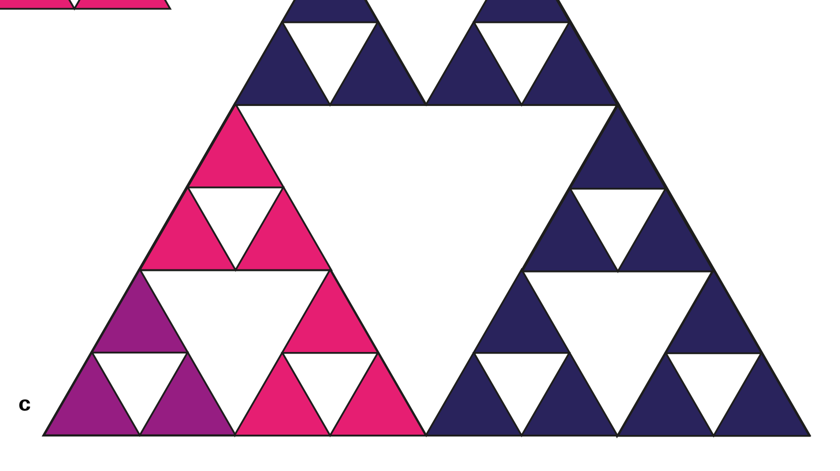
Um dieses 1915 vom polnischen Mathematiker Wacław Sierpiński beschriebene Fraktal zu konstruieren, fügt man zunächst vier gleichseitige Dreiecke zu einem größeren gleichseitigen Dreieck zusammen. Entfernt man das mittlere, auf der Spitze stehende Dreieck aus diesem Gebilde, entsteht das Sierpiński-Dreieck erster Generation (a). Die zweite Generation folgt aus der Kombination von vier Sierpiński-Dreiecken erster Generation zu einem größeren gleichseitigen Dreieck, aus dem man wieder den mittleren Teil entfernt (b). Wiederholt man diese Prozedur immer weiter (c), entsteht ein selbstähnliches Muster.

Um Elektronen in ein solches Fraktal einzusperren, brauchten die Physiker zuerst eine ebene Fläche, in der sich die Teilchen möglichst frei bewegen können. Dabei half ihnen eine dünne Kupferschicht, deren Atome in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind. Die Elektronen auf der Oberfläche dieses Kristalls dringen nicht in das Material ein und behindern sich gegenseitig kaum, so dass sie annähernd frei in der zweidimensionalen Ebene fließen.

Nun mussten Kempkes und sein Team eine für die Elektronen unpassierbare Begrenzung finden, mit der sie das fraktale Muster abstecken konnten. Dazu übersäten sie die Kupferschicht mit Kohlenstoffmonoxid-Molekülen, die sich in einem hexagonalen Gitter auf

b



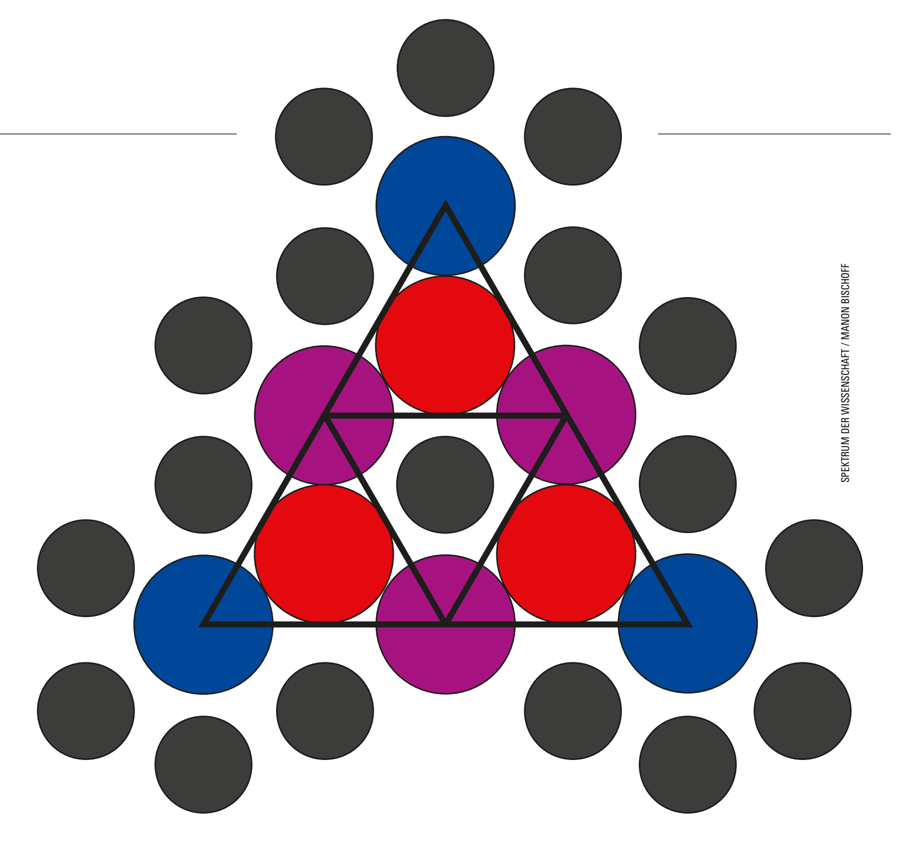


Die ersten drei Generationen des Sierpiński-Dreiecks (a bis c). Die Farben verdeutlichen, wie sich das Fraktal aus den einzelnen Bestandteilen zusammensetzt.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

der Oberfläche verteilten. Die Elektronen der Kupferatome prallen an Kohlenstoffmonoxid ab und können es nicht durchqueren. Anschließend stellten die Forscher Sierpiński-Dreiecke erster, zweiter und dritter Generation her, indem sie gezielt einige Moleküle mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops entfernten.

Ein Rastertunnelmikroskop ist ein vielfältig einsetzbares Laborinstrument, mit dem man die mikroskopische Beschaffenheit von Oberflächen abbilden, die Energiedichte einer Probe untersuchen oder einzelne Atome und Moleküle verschieben kann. Es besteht aus einer Vakuumkammer, in der eine Probe auf wenige Grad Celsius über dem absoluten Temperaturnullpunkt gekühlt wird, und einer Spitze, die so dünn ist, dass sie an ihrer schmalsten Stelle aus nur wenigen Atomen besteht. Zwischen der Spitze und der Probe liegt eine elektrische Spannung an. Als Kempkes und seine Kollegen die Spitze



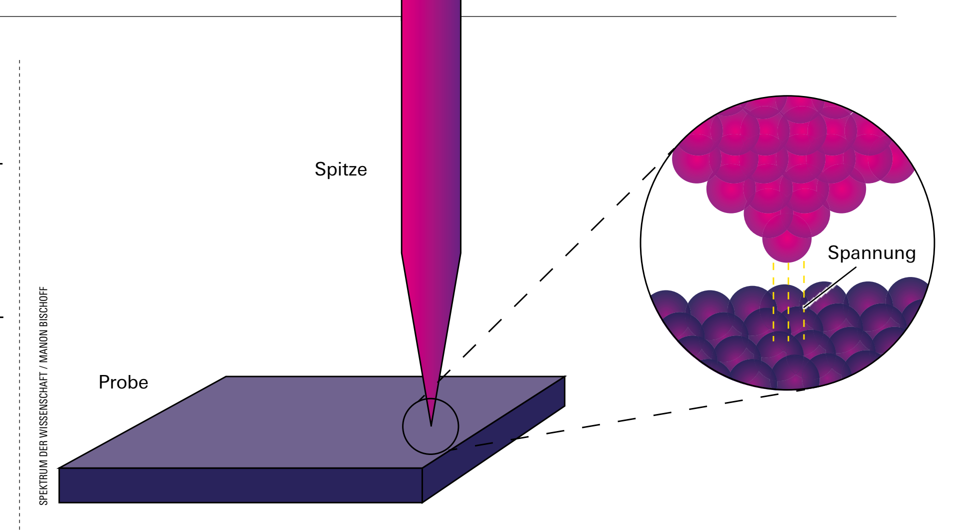
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Mit Kohlenstoffmonoxid-Molekülen (schwarz) steckten die Forscher ein Sierpiński-Dreieck erster (hier illustriert), zweiter und dritter Generation ab. Die Elektronen der Kupferatome (blau, lila, rot) sind innerhalb der dadurch eingegrenzten fraktalen Struktur gefangen.

extrem nah an ein einzelnes Kohlenstoffmonoxid-Molekül führten, konnten sie mittels der elektrischen Spannung das Teilchen wie mit einer Pinzette verschieben.

Als sie auf diese Weise die ersten drei Generationen der Sierpiński-Dreiecke erzeugt hatten, wollten die Wissenschaftler prüfen, ob die Elektronen auch wirklich in der fraktalen Struktur gefangen waren. Das sollte sich in ihrer Wellenfunktion zeigen, die ein Maß für ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist und unter anderem die Form der Atomorbitale bestimmt.

Um die Wellenfunktionen der Elektronen abzubilden, nutzten Kempkes und seine Kollegen wieder ein Rastertunnelmikroskop. In diesem Fall setzten sie die Spitze an einen festen Ort über der Probe und variierten die angelegte Spannung zwischen der Spitze und der Probe. Ist die Spitze nah genug an der Kupferschicht, können die Elektronen durch das Vakuum in die Spitze hineintunneln und im Rastertunnelmikroskop einen Stromfluss erzeugen. Wie erwartet steigt mit der Spannung auch der Tunnelstrom an. Aus der Änderung des Stromflusses mit wachsender Spannung können Wissenschaftler ermitteln, wie viele Elektronen welche Energie an der untersuchten Stelle in der Kupferschicht haben.



Die Spitze eines Rastertunnelmikroskops besteht aus nur wenigen Atomen (pink). Zwischen ihr und der Probe (lila) liegt eine Spannung an, so dass Wissenschaftler mit der Spitze Atome und Moleküle verschieben oder die Energiedichte der Elektronen in den Atomorbitalen erfassen können.

Selbstähnliche Muster in der Wellenfunktion

Mit dieser Methode bildeten Kempkes und sein Team die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen innerhalb der Sierpiński-Dreiecke ab. Sie erkannten darin selbstähnliche Strukturen, wie sie für Fraktale typisch sind: So taucht die Form der Wellenfunktionen innerhalb eines Sierpiński-Dreiecks erster Generation mehrmals in einem Sierpiński-Dreieck zweiter und dritter Generation auf.

Durch die abgebildeten Aufenthaltswahrscheinlichkeiten haben Kempkes und sein Team ermittelt, in welcher Dimension die Elektronen der Kupferschicht gefangen sind. Dazu überdeckten die Forscher jene Bereiche, in denen sich die Elektronen wahrscheinlich aufhalten, mit immer kleiner werdenden Kreisscheiben. Sie berechneten einen Wert von 1,58, was in guter Näherung der Hausdorff-Dimension $\log(3)/\log(2) \approx 1{,}585$ des Sierpiński-Dreiecks entspricht. Zum Vergleich wiederholten die Wissenschaftler die Prozedur mit freien Elektronen an der Oberfläche verschiedener ebener Kristallgitter ohne fraktale Begrenzung und erhielten jedes Mal die erwartete Dimension zwei.

Damit haben sie den Grundstein zur Erforschung quantenmechanischer Teilchen in gebrochenzahligen Dimensionen gelegt. In künftigen Versuchen möchten sie herausfinden, wie sich Elektronen in Fraktalen verhalten, die sich in einem starken Magnetfeld befinden. In zwei Dimensionen führt das zum berühmten Quanten-Hall-Effekt, bei dem die Wellenfunktion der Teilchen zum Teil topologische Eigenschaften besitzt. Solche Zustände gelten momentan als Hoffnungsträger für neuartige Technologien. Bisher weiß man, dass der Quanten-Hall-Effekt nur in geraden Raumdimensionen auftritt. Aber wie sieht es in fraktalen Fällen aus?

Diesem Problem stellte sich im Juli 2018 eine Gruppe um den theoretischen Physiker Titus Neupert von der Universität Zürich. Für den Fall, dass Elektronen in einem Sierpiński-Dreieck gefangen sind, haben die Forscher berechnet, dass die Teilchen bei Anwesenheit eines extrem hohen Magnetfelds ebenfalls topologische Eigenschaften an den Tag legen. Demzufolge ähnelt dieses Phänomen dem Quanten-Hall-Effekt. Somit scheint es, dass sich die Physik im fraktalen Sierpiński-Dreieck ähnlich verhält wie im zweidimensionalen Fall.

Die wohl spannendste Frage auf dem Gebiet lautet aber: Was passiert, wenn Elektronen in fraktalen Strukturen untereinander stark wechselwirken? Auf der von Kempkes und seinem Team eingesetzten Kupferoberfläche kommen sich die Teilchen kaum in die Quere, und man kann daher ihre elektrischen Kräfte untereinander vernachlässigen. In anderen Materialien können sich Elektronen aber stark abstoßen, was neue, aufregende Einblicke in die Physik verspricht – gerade im topologischen Bereich.

Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Kempkes, S. et al.: Design and characterization of electrons in a fractal geometry. Nature Physics, 2018

Neupert, T. et al.: Topology in the Sierpiński-Hofstadter problem. Physical Review B 98, 2018



SPRINGERS EINWÜRFE
GÖTTLICHE HÜTER DER MORAL

In alten Kulturen sorgten strafende Gottheiten für sozialen Zusammenhalt. Konnten sich nur auf dieser Grundlage komplexe Gesellschaften herausbilden?

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

spektrum.de/artikel/1640010

Wer religiös erzogen wurde, der weiß noch gut, wie einschüchternd die Vorstellung einer übernatürlichen Beobachtungsinstanz wirkt, die Missetaten auch dann zu bestrafen droht, wenn man sie hinter dem Rücken irdischer Aufsichtspersonen begeht. So erscheint die Annahme ganz plausibel, dass im Lauf der Menschheitsgeschichte größere Gesellschaften durch die Fiktion einer allwissenden Moralinstanz entstehen konnten, die asoziales Verhalten verbot. Ohne strafende Götter, so die Vermutung, wären die frühen Kulturen, in denen ja nicht mehr nur enge Verwandte und Bekannte zusammenlebten, rasch an der mangelnden Kooperation von Egoisten und Trittbrettfahrern zu Grunde gegangen. Für die These sprechen psychologische Experimente, die erforschen, wie sich Sozialverhalten in Gruppen zu entwickeln vermag.

Doch mussten es unbedingt jenseitige Aufpasser sein? Waren göttliche Moralhüter eine notwendige Voraussetzung für komplexe Gesellschaften? Diese Frage hat ein Team um den Sozialanthropologen Harvey Whitehouse von der University of Oxford nun anhand einer gewaltigen Menge kultureller Daten eingehend untersucht *(Nature 568, S. 226–229, 2019)*.

Die Forscher nutzten die »Seshat: Global History Databank«, benannt nach einer altägyptischen, für Ahnenkult und Buchhaltung zuständigen Gottheit. Seit 2011 sammelt und ordnet »Seshat« historische Fakten zu Sozialstrukturen und Religionen aus aller Welt. Das Team um Whitehouse konnte damit 414 Gesellschaften aus den vergangenen 10000 Jahren hinsichtlich Komplexität und Religiosität vergleichen. Wie aus der zeitlichen Analyse der Seshat-Daten hervorgeht, wächst die Kenngröße »soziale Komplexität« vor dem Auftreten strafender Götter mehr als fünfmal so schnell wie danach. Das legt den Schluss nahe, dass moralisierende Gottheiten erst später erscheinen. Im umfangreichen Methodenteil des Artikels begründen die Forscher die Schlussfolgerung eingehend. Sie untergräbt die gängige Annahme, die Idee einer jenseitigen Instanz, die individuelles Fehlverhalten ahndet, sei eine notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Kultur.

Das bedeutet freilich nicht, diese Vorstellung hätte im Lauf der Menschheitsgeschichte keine Rolle gespielt. In der Seshat-Datenbank tauchen moralisierende Götter erstmals um 2800 v. Chr. in Ägypten auf. Wenn sechs Jahrhunderte später in Mesopotamien Handelsverträge in Keilschrift auf Tonscherben festgehalten wurden, fehlte nie die Berufung auf eine Gottheit als Garant der Vertragssicherheit. Und obwohl die griechischen Götter in moralischer Hinsicht gewiss fragwürdige Vorbilder darstellten, dienten sie im alten Rom dazu, jedem Angst einzujagen, der einen feierlichen Eid brach.

Selbst wenn übernatürliche Moralhüter nicht notwendig für die Herausbildung komplexer Sozialstrukturen waren, so trugen sie später zu deren dauerhafter Stabilisierung bei. Die einzige urbane Großgesellschaft, die keine individuell sanktionierenden Götter kannte, war das kurzlebige Reich der Inka; es wurde von inneren Kriegen zerrissen und war wohl schon vor Ankunft der spanischen Eroberer dem Untergang geweiht.

Falls komplexe Sozialsysteme auch ohne allwissendes Auge entstehen konnten – was sonst führte sie zusammen? Die Autoren der Studie verweisen auf den kollektiven Kitt durch komplizierte Rituale, etwa zur Beschwörung guter Ernten, deren Befolgung streng überwacht wurde. Jedenfalls definiert Dostojewskis berühmter Satz »Wenn es keinen Gott gibt, dann ist alles erlaubt« keine historische Voraussetzung für menschliche Kultur.

BIOLOGIE
DIE ENTWIRRUNG DES GENOMS

Die menschliche DNA bildet im Zellkern tausende Schlaufen. Diese helfen der Zelle auf verblüffende Weise, die eigene Genaktivität zu regulieren.



Erez Lieberman Aiden ist Direktor des Zentrums für Genomarchitektur am Baylor College of Medicine und der Rice University, beide in Houston (Texas).

⏩ spektrum.de/artikel/1640012

Manchmal ist es recht aufschlussreich, sich das menschliche Erbgut millionenfach vergrößert zu denken, um sich die räumlichen Relationen vor Augen zu führen. In diesem Maßstab wäre ein DNA-Molekül ungefähr so breit wie eine Spagetti. Alle 46 menschlichen Chromosomen hintereinandergelegt würden von Hamburg bis Moskau reichen, also zirka 1800 Kilometer weit – sie wären im Zellkern aber so dicht aufgewickelt, dass sie in ein Einfamilienhaus passten. Insgesamt tragen diese 46 Chromosomen zwei Sätze von je etwa 20000 Genen. Jedes enthält eine codierte Information, die der Zelle mitteilt, wie sie ein bestimmtes Protein herzustellen hat. Im Maßstab eins zu eine Million wäre ein Gen etwa so lang wie ein Auto.

AUF EINEN BLICK
VERWICKELTE SACHE

1. Die DNA des menschlichen Genoms bildet etwa 10000 Schlaufen. In den Zellen anderer Lebewesen finden sich ähnliche Strukturen.

2. Diese Schlaufen entstehen durch einen molekularen Mechanismus, der etwa so funktioniert wie die Schnallen an den einstellbaren Tragegurten eines Rucksacks.

3. Offenbar spielen die DNA-Schlingen eine wichtige Rolle in der Genregulation. Damit sind sie auch medizinisch sehr bedeutsam.

Würden wir in den hausgroßen Zellkern hineinblicken, dann sähen wir, wie die spagettidicke DNA darin pausenlos hin und her wackelte, angetrieben von der thermischen Eigenbewegung der Moleküle. Die zu Knäueln aufgewickelte DNA befände sich in ständiger brodelnder Bewegung. Vor etwa zehn Jahren, als Doktorand, rührte ich einmal die Spagetti in meinem Abendessen um, sah mir das dabei entstehende Gewirr auf dem Teller an und fragte mich: Wie verhindert die Zelle, dass die Molekülknäuel ihres Erbguts zu einem heillosen Durcheinander verknoten? Dies würde nämlich dazu führen, dass überlebenswichtige Gene im Gewirr blockiert würden, so dass die Synthesemaschinerie der Zelle sie nicht mehr ablesen könnte.

Tausende Schlingen

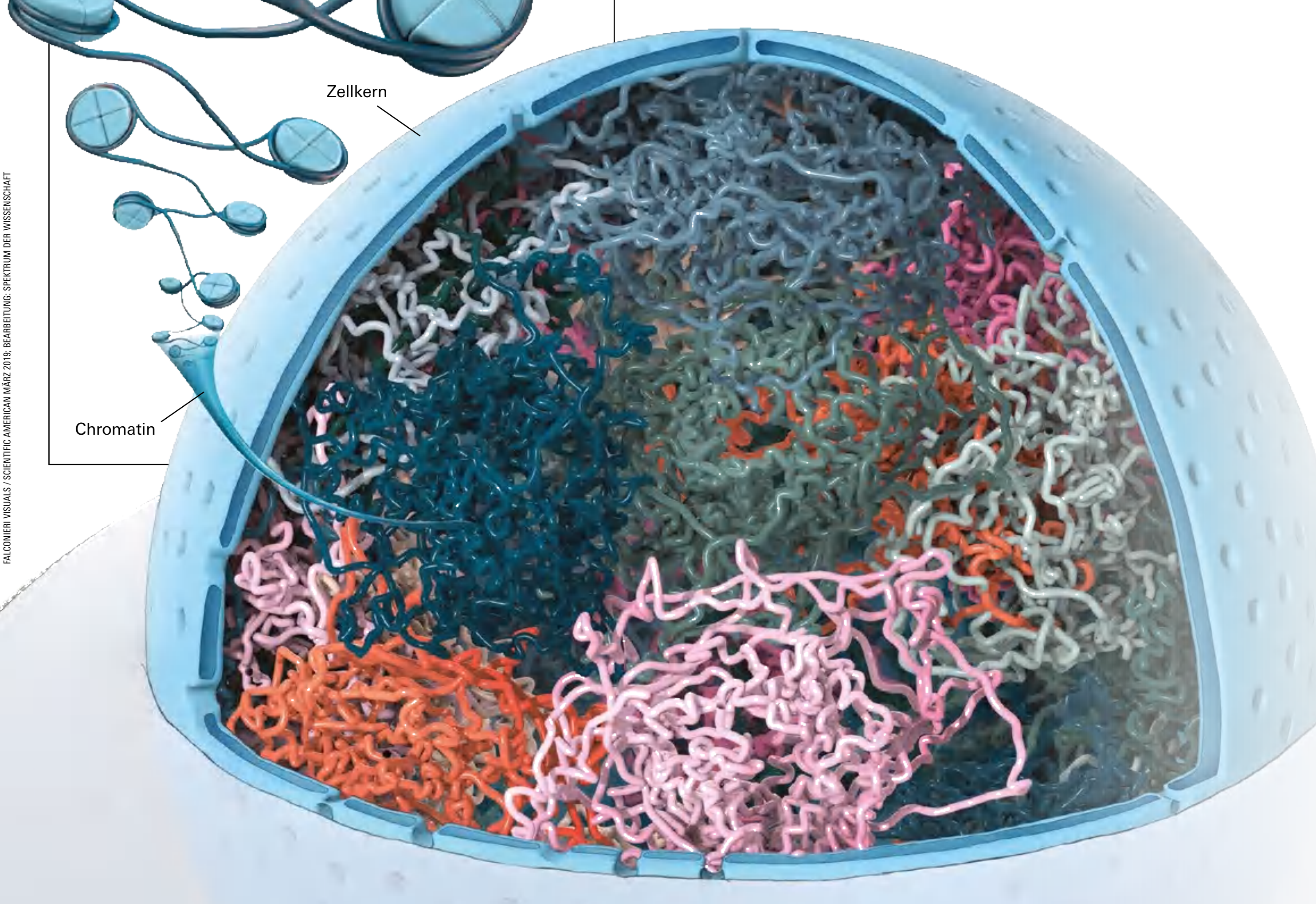
Im Jahr 2014 konnten mein Team und ich etwas zur Lösung dieses Rätsels beitragen. Dabei zeigte sich, dass das Erbgut im Zellkern rund 10000 Schleifen bildet. Es handelt sich offenbar um ein evolutionär sehr altes Strukturprinzip, denn dieselben molekularen Schlaufen finden sich vielfach auch bei Mäusen, mit denen wir über einen gemeinsamen Vorfahren verwandt sind, der vor mehr als 60 Millionen Jahren lebte. Dass sich das Prinzip über so lange Zeit erhalten hat, deutet darauf hin, dass es überlebensnotwendig ist.

Offenbar helfen die Schlaufen der Zelle dabei, die Genaktivität zu regulieren. Alle Zellen des Organismus enthalten dieselben Erbanlagen – jedoch dürfen, abhängig vom jeweiligen Körpergewebe, immer nur bestimmte davon aktiv sein. Andernfalls wären etwa Herzmuskelzellen und Neurone nicht voneinander unterscheidbar. Wie die Zellen es schaffen, manche Gene zu aktivieren und andere »stummzuschalten«, war lange Zeit ein Mysterium.

Indem wir die molekularen Schlingen weiter erforschen, hoffen wir, die Mechanismen der Genregulation besser zu verstehen und so auch die Ursachen zahlreicher Krankheiten zu enträtseln. In jüngster Zeit haben wir gemeinsam mit anderen Forschern herausgefunden, wie diese Schlaufen entstehen und warum das Genom dabei nicht rettungslos verknäult.

Das Genom in Schlaufen

Unter einem Mikroskop betrachtet ähnelt das Erbgut einer Zelle einem großen Spagetti-Haufen. Doch die Anordnung der DNA ist alles andere als zufällig. Das lang gestreckte Molekül bildet etwa 10000 Schlingen, die sich erstaunlicherweise nicht ineinander verheddern. Ein molekularer Mechanismus sorgt für eine kontrollierte Schlaufenbildung. Er hat großen Einfluss darauf, welche Gene aktiv sind, und bestimmt damit maßgeblich die Zellfunktion.



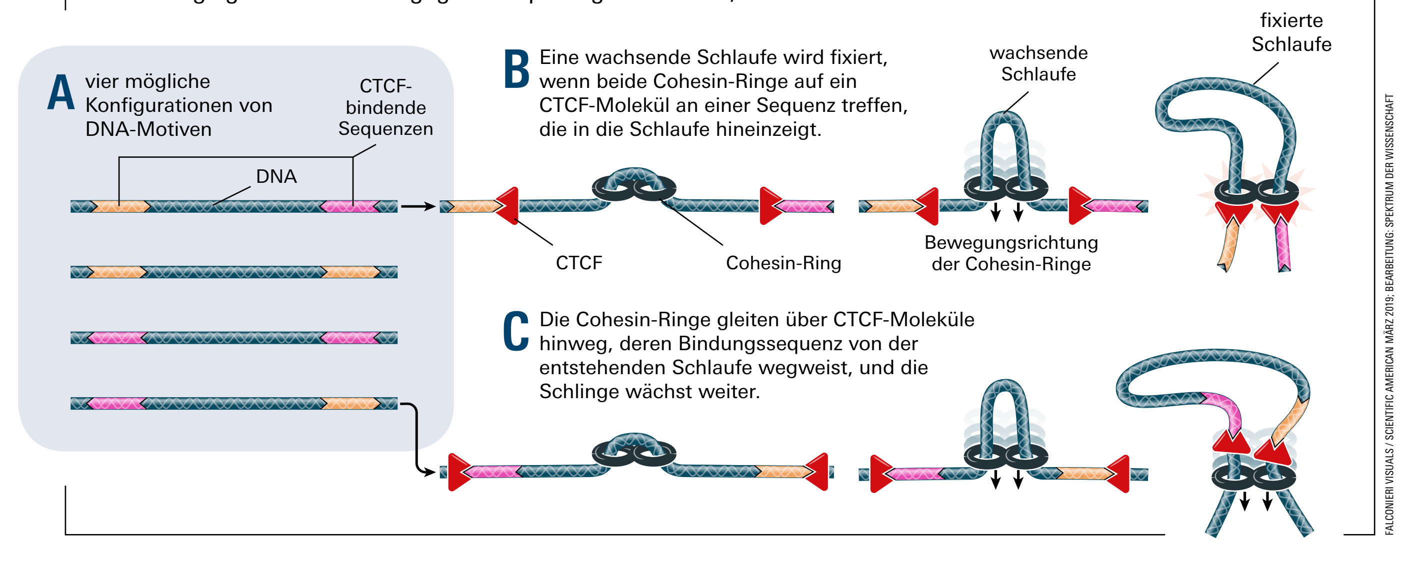
Chromosomen bestehen zum großen Teil aus DNA. Damit sie in den Zellkern passen, ist die DNA um Histonproteine gewickelt. Das Konglomerat aus Nukleinsäure und Histonproteinen wird als Chromatin bezeichnet. Verschiedene Farben im Bild repräsentieren unterschiedliche Chromosomen.

Mein Interesse an dem Thema rührte von einer übergeordneten Frage her: Wie beeinflusst die dreidimensionale Struktur der DNA im Zellkern die Genaktivität? Seit dem Ende der 1970er Jahre mehrten sich die Hinweise darauf, dass bestimmte Abschnitte der DNA, die so genannten Enhancer, die Aktivität von Genen erhöhen, indem sie den Zellapparat dazu bringen, diese Erbanlagen verstärkt abzulesen. Ein typischer Enhancer ist einige hundert Basenpaare lang und beeinflusst die Aktivität jeweils eines bestimmten Gens. Schon bald stellten Biologen verwundert fest, dass Enhancer mitunter sehr weit entfernt von ihren jeweiligen Zielgenen liegen: Der Abstand auf dem DNA-Strang kann mehrere tausend Basenpaare betragen. Daher kam die Vermutung auf, der DNA-Strang sei so gefaltet, dass die Enhancer in räumliche Nähe zu den »Anschalter-Sequenzen« ihrer Zielgene (den so genannten Promotoren) gerieten. Aber konnte das stimmen? Ich war von diesem Rätsel fasziniert und sah nur eine Möglichkeit, es zu lösen: detailliert aufzuklären, welche Schlaufen das DNA-Molekül bildet.

Der methodische Ansatz hierfür war im Grunde simpel. Sind zwei Abschnitte auf dem DNA-Strang weit voneinander entfernt, befinden sich jedoch auffällig oft in räumlicher Nähe zueinander, dann hat sich die DNA dort wahrscheinlich in eine Schlaufe gelegt und die beiden Abschnitte so zu Nachbarn gemacht. Was wir also benötigten, war eine Methode, um zu messen, wie häufig zwei jeweils ausgewählte Segmente des Genoms miteinander interagieren – wir brauchten so etwas wie Facebook für das menschliche Erbgut.

Durchfahrt nur in eine Richtung

Die Schlaufenbildung beginnt, wenn sich ein Molekülkomplex aus zwei miteinander verbundenen Untereinheiten an die DNA heftet. Der Komplex namens Cohesin ähnelt einem Doppelring mit der Form einer Acht, und er lagert sich so an, das der DNA-Strang erst durch den einen Ring tritt und dann durch den anderen wieder zurückläuft. Beide miteinander verbundenen Ringe gleiten nun in entgegengesetzter Richtung auf dem DNA-Strang entlang und schieben dabei eine DNA-Schlaufe nach oben heraus. Ein Protein namens CTCF kann diesen Prozess stoppen, doch nur unter einer Bedingung: CTCF koppelt an eine bestimmte DNA-Sequenz, die in zwei verschiedene Richtungen orientiert sein kann (A). Trifft ein Cohesin-Ring auf ein CTCF-Molekül, das an eine Sequenz gebunden ist, die in die entstehende Schlaufe hineinzeigt, bleibt er stehen. Haben schließlich beide Ringe eine solche nach innen gerichtete CTCF-Sequenz erreicht und angehalten, ist die Schlaufenbildung abgeschlossen (B). Trifft der Cohesin-Ring hingegen auf ein CTCF-Molekül an einer andersherum orientierten Bindungssequenz, gleitet er darüber hinweg, und die Schlinge wächst weiter (C).



FALCONIERI VISUALS / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Hierzu veränderten wir ein Verfahren, das ein Team um die Biologin Katherine Cullen, damals an der Vanderbilt University, bereits 1993 entwickelt hatte. Den zu der Zeit verfügbaren Methoden der Bildgebung entzog sich die menschliche DNA, da die Chromosomen während der Bildaufnahme zu sehr zappelten. Doch Cullen konnte die Rastlosigkeit der Moleküle zu ihrem Vorteil nutzen. Sie wusste: Wenn die DNA im Zellkern ungeordnet hin und her zittert, müssen Teile von ihr dann und wann zusammenstoßen. Abschnitte, die infolge der DNA-Faltung nahe beieinanderliegen, werden dabei öfter kollidieren als solche, zwischen denen eine große Distanz besteht. Könnte man also ihre jeweiligen Kollisionshäufigkeiten messen, so die Überlegung von Cullen, dann könnte man daraus zumindest grob die 3-D-Struktur des Genoms ableiten.

Zu diesem Zweck entwickelten Cullen und ihr Team den so genannten Nuclear Ligation Assay (NLA). Bei jenem Verfahren fixieren die Forscher zunächst die räumliche Struktur der DNA in den Kernen von Zellen, ohne dabei die Kerne zu zerstören. Dann zerschneiden sie mit Hilfe eines Enzyms die DNA in kleine Stücke, so dass ein Gemisch aus DNA-Schnipseln entsteht. Hierauf geben sie ein Protein hinzu, das die Enden jeweils benachbarter Schnipsel verbindet. Schließlich ermitteln sie die Basenabfolge der entstandenen DNA-Konstrukte. Wenn sich dabei immer wieder zeigt, es sind Abschnitte verbunden worden, die auf dem ursprünglichen DNA-Strang einen großen Abstand zueinander hatten, dann lässt sich daraus schließen, dass diese Abschnitte im Zellkern, wo die DNA eng aufgewickelt vorliegt, nah beieinander positioniert sind.

Cullen konnte mit ihrem Verfahren zeigen, dass es viele DNA-Bereiche gibt, die auf dem Strang weit voneinander entfernt sind, aber dennoch überraschend oft in Kontakt miteinander kommen und folglich im Zellkern benachbart sein müssen – weil das Segment zwischen ihnen eine Schleife formt.

Im Jahr 1993 war der NLA methodisch noch äußerst anspruchsvoll. Als ich jedoch als Doktorand Mitte der 2000er Jahre erstmals auf Cullens Arbeit stieß, lagen bereits vollständige Sequenzdaten zum menschlichen Genom vor, und die Kosten einer solchen Sequenzierung fielen rapide. Zusammen mit drei Kollegen vom MIT und der Harvard University (Chad Nusbaum, Andreas Gnirke und Eric Lander) entwickelte ich ein experimentelles Verfahren, das sich an den NLA anlehnte, aber die Kontakthäufigkeit nicht nur für ein einzelnes Paar von DNA-Abschnitten ermittelte, sondern für alle möglichen solchen Paare im gesamten Genom gleichzeitig. Das Verfahren erlaubte es

uns auch zu bestimmen, woher die verschiedenen Anteile der verbundenen DNA-Fragmente jeweils stammten.

Unsere neue Methode basierte auf einer Variante des NLA, die der Biochemiker Job Dekker von der University of Massachusetts entwickelt hatte. Statt intakte Zellkerne zu verwenden, wie es Cullen und ihr Team seinerzeit getan hatten, brach Dekker diese auf und führte die Verknüpfung der DNA-Schnipsel in extrem verdünnter Lösung durch. Jenes Vorgehen, das Dekker als »chromosome conformation capture« oder »3C« bezeichnete, sollte verlässlichere Werte dafür liefern, wie oft bestimmte DNA-Abschnitte miteinander in Wechselwirkung treten.

Zweifach zerhäckselt

Wir erweiterten das 3C-Verfahren um einige Schritte. Bevor wir die DNA-Schnipsel miteinander verbanden, versahen wir deren Enden mit leicht erkennbaren molekularen Markern, um die genaue Position zu kennzeichnen, an der die Verknüpfung stattfindet. Nachdem die Verschmelzung erfolgt war, zerschnitten wir die entstandenen Konstrukte abermals in kleinere Schnipsel und isolierten daraus nur jene Stücke, die die Marker trugen – und somit die Verknüpfungsstellen aus dem vorherigen Schritt. Gemeinsam mit Dekker und seinen Kolleginnen Nynke van Berkum und Louise Williams fanden wir heraus, dass wir so Millionen räumlich benachbarter DNA-Abschnitte auf einmal identifizieren können. Ich nenne die Methode »Hi-C«, in Abwandlung von »3C« und nach einem meiner Lieblingsgetränke als Kind. Publiziert haben wir das Verfahren im Jahr 2009.

Unsere allerersten Hi-C-Karten ganzer Genome zeigten, dass die Chromosomen im Zellkern trotz ihrer ständigen Zitterbewegungen nicht zu einem zufälligen Wirrwarr verknäult sind. Stattdessen weist jedes Chromosom verschiedene Domänen auf – mit jeweils mehreren Abschnitten darin, die untereinander häufig in Kontakt kommen. Dagegen treten die Abschnitte einer Domäne mit solchen einer anderen seltener in Wechselwirkung. Unsere Hi-C-Daten zeigten außerdem, dass alle Domänen in je einer von zwei größeren, räumlich benachbarten Zonen im Zellkern sitzen. Wir nannten diese Zonen Kompartiment A und Kompartiment B (ein Kompartiment ist ein abgegrenzter Reaktionsraum, etwa innerhalb einer Zelle).

Wie sich herausstellte, zeigt Kompartiment A zahlreiche Anzeichen für genetische Aktivität – etwa das Vorhandensein von Boten-RNA, die der Zelle als Bauanleitung für Proteine dient. Kompartiment B erwies sich als dichter gepackt und genetisch weitgehend inaktiv. Wechselten die Domänen vom aktiven in den inaktiven Zustand oder umgekehrt, dann wechselten sie auch das Kompartiment. Heute wissen wir: Der Zellkern enthält tatsächlich zahlreiche Unterkompartimente vom Typ A beziehungsweise B.

Die Entdeckung dieser räumlichen Gliederung faszinierte uns, denn sie bestätigte, dass die 3-D-Struktur des Erbguts im Zellkern nicht zufallsbestimmt ist, sondern eng mit der Genaktivität zusammenhängt. Doch war ich herb enttäuscht, dass ein bestimmtes Faltungsmuster der DNA in den Hi-C-Daten nie aufzutreten schien, und zwar Schlaufen!

Hi-C-Daten werden in der Regel als Heatmap präsentiert, als Diagramm, das zeigt, wie oft zwei Segmente eines Chromosoms miteinander in Berührung kommen. Die Kontakthäufigkeit ist dabei als Helligkeits- oder Grauwert des Schnittpunkts beider Ortspositionen dargestellt. Eine DNA-Schlaufe sollte sich hier als ungewöhnlich heller Fleck zeigen, der den beiden Fußpunkten der Schlinge auf dem DNA-Strang entspricht. Doch solche Intensitätsmaxima fanden wir nicht. Daher konnten wir auch nicht untersuchen, ob Enhancer ihre zugehörigen Gene aktivieren, indem sie in die räumliche Nähe von deren Promotoren kommen.

Dieses Problem beschäftigte uns ganze drei Jahre lang. 2012 fanden meine Mitarbeiter Suhas Rao und Miriam Huntley endlich heraus, was in unseren Experimenten schiefgelaufen war. Sie erkannten, dass das Aufbrechen der Zellkerne, das wir im Rahmen der Hi-C-Methode vorgenommen hatten, feine Strukturen wie DNA-Schlaufen zerstörte. Also modifizierten sie das Verfahren abermals, und zwar dahingehend, dass es die Zellkerne während der Verknüpfung der DNA-Schnipsel intakt ließ.

Das neue Verfahren, wir nannten es In-situ-Hi-C, brachte den Durchbruch. Bei Untersuchungen an weißen Blutzellen fanden wir auf den Heatmaps nun zahlreiche helle Punkte, die jeweils einer mutmaßlichen DNA-Schleife entsprachen. Ich wagte kaum, meinen Augen zu trauen, denn ich hatte schon seit sechs Jahren auf diesen Erfolg gehofft. Um ganz sicherzugehen, nahm ich die Heatmaps sogar mit nach Hause und zeigte sie meinem damals drei Jahre alten Sohn. »Siehst du hier einen Punkt?«, fragte ich ihn. »Ja«, antwortete er. »Kannst du darauf zeigen?« Er konnte es.

Unterschiede zwischen Körpergeweben, Gemeinsamkeiten zwischen Spezies

Und damit hatten wir nun Karten, die rund 10 000 DNA-Schlaufen anzeigten, verteilt über das gesamte menschliche Genom. Wir überprüften, ob diese Schleifen möglicherweise Enhancer und Promotoren von Genen miteinander in Kontakt brachten. Und tatsächlich traf dies in vielen Fällen zu.

In weiteren Experimenten verglichen wir die Heatmaps von menschlichen Blut- mit denen von Lungengewebszellen. Wir fanden vielfach dieselben Schlaufen, aber ebenso solche, die sich zwischen den Zelltypen unterschieden und von denen wir annahmen, dass sie andere Enhancer und Zielgene betrafen. Diese Unterschiede in den Schleifenmustern hatten anscheinend mit der Genregulation zu tun, die einer Zelle ihre gewebespezifische Identität verleiht.

Wir fragten uns, ob einige DNA-Schlaufen, die in menschlichen Zellen zu beobachten sind, auch in den Zellen anderer Organismen auftreten. Deshalb kartierten wir sie in Zellen von Mäusen und fanden heraus, dass ungefähr die Hälfte von ihnen an Stellen saßen, die vergleichbaren Positionen im menschlichen Genom entsprachen. Diese übereinstimmenden Schlingen sind folglich mindestens während der zurückliegenden 60 Millionen Jahre konserviert gewesen.

Interessanterweise zeigten unsere Ergebnisse, dass die Schlaufen nicht statisch sind: Sie scheinen sich immer wieder aufzulösen und neu zu bilden. Natürlich wollten wir wissen, wie das funktioniert. Zunächst nahmen wir an, dass daran wohl sehr viele Proteine beteiligt seien – vielleicht sogar hunderte. Die Daten belehrten uns jedoch schon bald eines Besseren. Schleife für Schleife wurden wir immer

wieder mit denselben beiden Proteinfaktoren konfrontiert. Einer davon ist das Eiweiß CTCF, das der Onkologe Victor Lobanenkow und sein Team 1990 am Institut für Krebsentstehung in Moskau entdeckt hatten. CTCF enthält elf so genannte Zinkfinger, die es ihm ermöglichen, sich sehr fest an bestimmte Stellen der DNA zu binden. Bei dem anderen Faktor handelt es sich um Cohesin, einen ringförmigen Proteinkomplex, den 1997 der britische Biologe Kim Nasmyth charakterisierte, damals am Forschungsinstitut für Molekulare Pathologie in Wien. Viele Wissenschaftler vermuteten, dass Cohesin-Ringe sich jeweils paarweise verbinden und dann als Einheit funktionieren, wobei jeder der beiden Ringe den DNA-Strang umschließt und frei darauf entlanggleitet – wie ein Fingerring, der auf eine Halskette gefädelt wurde.

Diese beiden Proteinfaktoren an den DNA-Schleifen vorzufinden, war keine völlige Überraschung für uns. Zahlreiche vorangegangene Studien hatten gezeigt, dass sie möglicherweise an der DNA-Faltung mitwirken. Allerdings hatten wir nicht damit gerechnet, dass sie so häufig auftreten – insbesondere an den Fußpunkten von Schlaufen, die Promotoren und Enhancer miteinander in Kontakt bringen.

Dann stolperten wir aber über etwas wirklich Merkwürdiges. Rao, Huntley und ich baten den Informatiker Ido Machol darum, die Verteilung von Histonen in räumlicher Nähe zu CTCF-Molekülen zu untersuchen. Histone sind Proteine, die an der Verpackung der DNA im Zellkern mitwirken, indem sich der DNA-Strang um sie wickelt. Machol sah sofort, dass außerhalb der DNA-Schlaufen mehr Histone saßen als innerhalb – als ob die Histone wüssten, wo sich die Schleifen befinden. Zunächst vermutete ich einen Fehler in Machols Methode, doch wir fanden keinen.


GERNOT KRAUTBERGER / FOTOLIA

Also begannen wir, nach einer biologischen Erklärung für unsere erstaunliche Beobachtung zu suchen. In dem Fachartikel, in dem Victor Lobanenkow die Entdeckung von CTCF publiziert hatte, hieß es, dass sich das Protein nicht an beliebige Stellen der DNA bindet. Vielmehr koppelt es stets an eine spezifische DNA-Sequenz, einen Abschnitt mit etwa 20 Basenpaaren. Da die DNA eine Doppelhelix ist, besitzt sie zwei (gegenläufige) Stränge. Eine bestimmte Sequenz wie jene mit 20 Basen kann auf jedem der beiden Stränge erscheinen und in jede der beiden möglichen Strangrichtungen orientiert sein. Ihre Ausrichtung ist dabei oft zufallsbestimmt: Mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit läuft sie von links nach rechts und ebenso wahrscheinlich von rechts nach links. Wir erwarteten daher, die CTCF-bindenden Sequenzen an den Fußpunkten der DNA-Schlaufen in zufälliger Orientierung vorzufinden.

Zu unserer Verblüffung zeigten die Untersuchungen, dass die beiden kurzen CTCF-bindenden Sequenzen am Fußpunkt jeder Schleife immer aufeinander zuwiesen, auch wenn zwischen ihnen Millionen DNA-Buchstaben lagen. Sie deuteten stets in die Schlaufe hinein, was wir als konvergente Orientierung bezeichneten. Dies lieferte uns eine Erklärung dafür, woher die Histone »wissen«, in welchen Zonen sie sich an die DNA anzulagern haben – sie müssen nur »beachten«, in welche Richtung die CTCF-Bindungssequenz zeigt.

Um uns bildhaft vor Augen zu führen, was das bedeutet, müssen wir uns das Genom, wie eingangs schon, millionenfach vergrößert vorstellen. Dann sind die beiden CTCF-Bindungssequenzen, die einen schlaufenbildenden DNA-Abschnitt begrenzen, je fünf Millimeter lang, während das Segment zwischen ihnen bis zu einen Kilometer messen kann. Und doch, wie von Zauberhand gesteuert, sind sie stets gegensinnig ausgerichtet und weisen aufeinander zu. Wir waren verblüfft.

Zufälliges Gewackel konnte nicht die richtige Erklärung sein

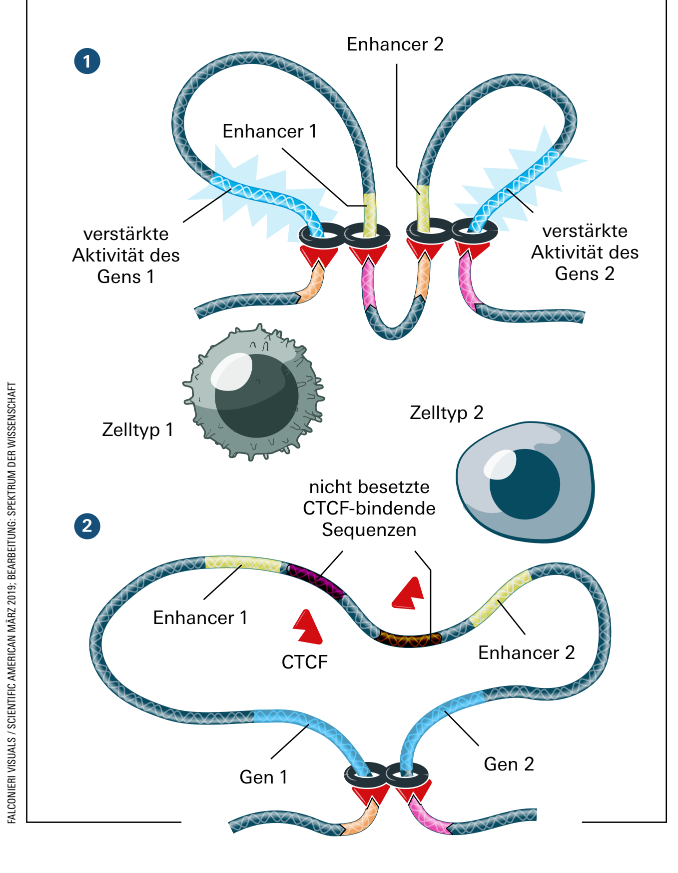
Damals herrschte die Auffassung vor – auch in unserem Team –, DNA-Schlaufen bildeten sich durch Diffusion. Dieser Vorstellung nach bindet sich ein Protein, das die Schleifenbildung ermöglicht, an ein Ende des entsprechenden DNA-Abschnitts. Ein weiteres solches Protein lagert sich an das andere Ende an. Der DNA-Strang mit den beiden angehefteten Proteinen wackelt nun im Zellkern umher. Sobald diese Zufallsbewegung die beiden Eiweiße in räumliche Nähe zueinander bringt, koppeln sie aneinander und formen damit eine DNA-Schlaufe. Das Problem an dieser Hypothese: Der DNA-Strang hat so viel Bewegungsspielraum, dass die Orientierung der CTCF-bindenden Sequenzen für die Schlaufenbildung keine Rolle spielen dürfte. Wir hatten aber nun einmal die konvergente Orientierung nachgewiesen. Und nicht nur wir: Binnen zweiter Jahre wurden unsere Ergebnisse sowohl von einem Team um Suzana Hadjur vom University College London als auch von einem um Yijun Ruan vom Jackson Laboratory (Farmington, Connectitut) bestätigt. Die konvergente Orientierung war nicht wegzudiskutieren und ließ vermuten, dass die Diffusionshypothese falsch war.

Wenn sich DNA-Schlaufen nicht mittels Diffusion bilden, wie dann? Und welche Rolle spielen dabei CTCF und Cohesin? Wir taten das, was wir immer tun, wenn wir vor solch kniffligen Rätseln stehen: Wir spielten mit unseren Kopfhörerkabeln.

Ich bin mir ziemlich sicher, dass die meisten Wissenschaftler, die über DNA-Faltung forschen, stets ein schnurähnliches Objekt griffbereit haben: ein Stück Seil, einen flexiblen Plastikschlauch oder etwas in dieser Art. Grübelt man über einer schwierigen Frage bezüglich der räumlichen Struktur der DNA, holt man es hervor und spielt damit herum. Suhas Rao und ich probierten also an unseren Kabeln mögliche Modelle der Schlaufenbildung aus, als uns plötzlich aufging, dass die Antwort nicht in den Kopfhörerkabeln zu finden war, sondern in den Gurten unserer Rucksäcke.

Die Nähe entscheidet

Damit ein Gen stärker aktiv wird, muss ein Bestandteil von ihm, der so genannte Promotor, mit einem DNA-Segment namens Enhancer in Kontakt kommen. Doch die Enhancer befinden sich auf dem DNA-Strang oft weit von ihren zugehörigen Genen entfernt. Schlaufen in der DNA-Struktur können dieses Problem lösen, indem sie den Enhancer und den Promotor eines Gens in räumliche Nähe zueinander bringen (1). Alle Zellen eines Organismus besitzen die gleichen Erbanlagen und die gleichen CTCF-bindenden Sequenzen, aber jede Zelle kann die Aktivität bestimmter Gene unterdrücken, indem sie die entsprechenden DNA-Schlingen entfernt – beispielsweise indem sie die Bindung von CTCF an die jeweiligen DNA-Bereiche verhindert (2).



FALCONIERI VISUALS / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Schnallen, mit denen man die Tragriemen eines Rucksacks einstellt, bestehen im Wesentlichen aus zwei Ringen, die fest miteinander verbunden sind (manchmal ist noch ein dritter Ring dabei, der zur mechanischen Stabilisierung dient). Der Gurt läuft durch den ersten Ring hindurch, macht eine Kehrtwendung und tritt durch den zweiten. Möchten Sie die Länge des Riemens verändern, schieben Sie den Gurt ein kleines Stück weit durch einen der Ringe, wobei eine Schlaufe entsteht. Diese lässt sich so lange vergrößern, bis Sie ans Ende des Gurts kommen.

Könnten Paare von Cohesin-Ringen ähnlich funktionieren wie Rucksackschnallen? Wir stellten uns dazu folgenden Mechanismus vor: Zunächst umschließt das Ringpaar die DNA an einer beliebigen Stelle, wobei der DNA-Strang erst durch den einen Ring tritt und dann durch den anderen wieder zurückläuft (siehe »Die Nähe entscheidet«, links). Dann gleiten die beiden fest miteinander verbundenen Ringe in entgegengesetzter Richtung an der DNA entlang – einer auf dem Strang nach links, der andere nach rechts. Dabei schieben sie nach oben eine immer größer werdende DNA-Schlinge heraus. Irgendwann erreicht der erste Ring eine Stelle, wo sich ein CTCF-Protein an den entsprechenden Sequenzbereich des Strangs geheftet hat. Falls die Sequenz so orientiert ist, dass sie auf den sich nähernden Cohesin-Ring hindeutet, stoppt er beim Kontakt mit dem CTCF-Molekül. Ist sie aber andersherum ausgerichtet, gleitet der Cohesin-Ring über die Stelle hinweg, bewegt sich auf dem Strang weiter und bleibt erst bei einem Abschnitt stehen, der auf ihn hinweist. Eine CTCF-bindende Sequenz mit dem angekoppelten Protein wirkt auf den näher kommenden Cohesin-Ring somit wie ein Stoppschild auf den Straßenverkehr: Ist das Schild dem anrollenden Fahrzeug zugewandt, bremst der Fahrer; zeigt es in die andere Richtung, fährt er weiter.

Dem zweiten Cohesin-Ring des Paars ergeht es genau wie dem ersten: Er gleitet so lange am DNA-Strang entlang, bis er auf eine einwärtsgerichtete CTCF-Bindungssequenz mit angekoppeltem Protein stößt und dort stoppt. Damit ist die Bildung der DNA-Schlinge abgeschlossen.

Ordentlich gewickelt

Falls Cohesin-Ringe tatsächlich so funktionieren, dann dürften DNA-Schlaufen nur zwischen solchen Paaren von CTCF-bindenden Sequenzen entstehen, die konvergent orientiert sind, also aufeinander zuzeigen. Rasch erkannten wir, dass dieser Mechanismus einen entscheidenden Vorteil für die Zelle hätte. Denn würden sich DNA-Schlaufen mittels Diffusion bilden, dann könnten sich mehrere von ihnen ineinander verflechten, was dazu führen würde, dass sich die Chromosomen verknoteten und verhedderten. Dies würde die Genregulation stören und außerdem verhindern, dass sich die Chromosomen während der Zellteilung ordnungsgemäß voneinander trennen. CTCF-»Stoppschilder« und Cohesin-Doppelringe bringen hingegen keine Knoten hervor – ebenso wenig, wie sich Ihre Rucksackgurte verknoten, wenn Sie sie verstellen.

Unser Modell war zunächst recht gewagt. Es beruhte auf zahlreichen Annahmen, die wir nicht belegen konnten, etwa dass Cohesin-Ringe an der DNA entlanggleiten. Doch als wir die Fachliteratur über Cohesin sichteten, stellten wir fest, dass Kim Nasmyth (der Entdecker des Proteinkomplexes) bereits 2001 einen solchen Mechanismus vorgeschlagen hatte. Wir führten detaillierte Computersimulationen durch, die sehr gut mit unseren Messdaten übereinstimmten. Und als mein Mitarbeiter Suhas Rao dann erneut mit echter DNA experimentierte, stellten sich exakt jene Ergebnisse ein, die das Computermodell vorhergesagt hatte.

Die Entfernung einer CTCF-Bindungssequenz am Fuß einer DNA-Schlaufe führte dazu, dass sich keine Schlinge

mehr bildete. Drehten wir die Orientierung einer solchen Sequenz um, verschwand die ursprüngliche DNA-Schlaufe und es bildete sich eine neue, und zwar auf der gegenüberliegenden Seite der Bindungssequenz. Fügten wir zusätzliche CTCF-Bindungssequenzen hinzu, entstanden an den entsprechenden Stellen ebenfalls neue Schlaufen (wenn die zusätzlichen Sequenzen richtig orientiert waren).

Als wir unsere Ergebnisse publizierten, kam Bewegung in das Feld. Ende 2015 veröffentlichten wir und zwei andere Gruppen mehrere Fachartikel mit Belegen dafür, dass die »3-D-Genomchirurgie« funktioniert. Weitere Teams bestätigten in ihren Arbeiten unser Modell. Endlich begann die wissenschaftliche Gemeinschaft, die DNA-Schlaufen auch konzeptionell zu entwirren.

Der Fortschritt vollzog sich jetzt in halsbrecherischem Tempo. An den Gladstone Institutes in San Francisco zeigten der Biologe Benoit Bruneau und seine Kollegen, dass Veränderungen am CTCF-Protein die Stabilität der DNA-Schlingen stark herabsetzen. Ein ähnliches Ergebnis erzielten der Entwicklungsbiologe Francois Spitz und seine Mitarbeiter am Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie in Heidelberg, indem sie ein Protein eliminierten, das die Bindung zwischen Cohesin und der DNA vermittelt. Ein Team um den Genetiker Benjamin Rowland vom Netherlands Cancer Institute in Amsterdam wiederum belegte: Das Ausschalten eines Faktors, der Cohesin von der DNA entfernt, lässt größere Schlaufen entstehen – vermutlich, weil Cohesin nun länger an der DNA entlanggleiten kann. In unserer eigenen Gruppe schließlich demonstrierte Suhas Rao, dass die Zerstörung der Cohesin-Komplexe binnen Minuten sämtliche cohesinvermittelten DNA-Schlingen beseitigt.

Unvergessliche Bildfolge mit dem Hauptdarsteller Condensin

Alle miteinander jedoch sehnten wir uns nach einer direkten Bestätigung: Wir wollten live beobachten, wie die Cohesin-Ringe am DNA-Strang entlangfahren. Cees Dekker und seinen Kollegen von der Technischen Universität Delft in den Niederlanden gelang genau das im Februar 2018. Sie arbeiteten mit Condensin aus Hefe – einem Proteinkomplex, der mit Cohesin eng verwandt ist – und nahmen eine Abfolge von Mikroskopbildern auf, die wir Genomarchitektur-Forscher wohl nie vergessen werden. Zuerst sieht man nur ein bandförmiges Stück DNA. Dann landet darauf das Condensin und bildet einen kleinen Knubbel. Dieses Knötchen wächst und wächst, bis der Betrachter plötzlich erkennt, was es ist: eine DNA-Schlaufe.

Während sich die Mechanismen der DNA-Schlaufenbildung nun Stück für Stück aufklären, rückt allmählich auch deren medizinische Bedeutung in den Blick. Der Genetiker Frederick Alt und sein Team von der Harvard University etwa untersuchen die Rolle des Prozesses bei der Antikörperproduktion. Unser Immunsystem stellt Antikörper gegen Krankheitserreger her, mit denen es noch nie konfrontiert war, indem es Segmente aus Antikörpergenen herausschneidet und andere einfügt. Alt und seine Kollegen haben herausgefunden, dass der Zellapparat dabei CTCF-vermittelte DNA-Schlaufen bildet und diese anschließend kappt.

Eine Gruppe um Stefan Mundlos vom Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin hat gezeigt: Die Veränderung einer einzigen CTCF-Bindungssequenz bei Mäusen führt dazu, dass deren Nachkommen unnormal viele Zehen ausprägen. Menschen mit einer entsprechenden Genmutation haben ebenfalls eine von fünf abweichende Anzahl von Fingern. Und Rafael Casellas von den National Institutes of Health (USA) berichtete, dass die Zerstörung von CTCF-Bindungssequenzen in Knochenmarkstumoren von Mäusen das Tumorwachstum um 40 Prozent reduzieren kann.

Hinsichtlich des molekularen Mechanismus ist vieles noch unverstanden. So herrschte lange Zeit die Auffassung vor, DNA-Schlaufen funktionierten wie Schalter: Liegt eine zwischen dem Enhancer und dem Promotor eines Gens, sollte dieses stärker abgelesen werden. Deshalb erwarteten wir, dass die Genexpression der Zellen aus dem Ruder laufen würde, sobald wir Cohesin ausschalteten – tausende Erbanlagen sollten dann eigentlich ihre Aktivität ändern. Bei vielen trat das auch ein, aber insgesamt passierte erstaunlich wenig. Offenbar funktionieren DNA-Schlaufen nicht wie binäre An/Aus-Schalter. Sie scheinen eher Schiebereglern zu ähneln, die die Genaktivität fein justieren. Vielleicht ist die Genregulation sogar nur ein Nebeneffekt der Schlaufenbildung und die Hauptfunktion eine ganz andere.

Wie alle Entdecker, die Neuland erkunden, benötigen wir jetzt bessere Karten. Im Rahmen des Projekts ENCODE (Encyclopedia of DNA Elements), das von den National Institutes of Health finanziert wird, arbeiten mein Kollege Yijun Ruan und ich zusammen mit anderen daran, den ersten Atlas der DNA-Schlingen im menschlichen Genom zu erstellen und die unterschiedlichen Muster der Schlaufenbildung in den verschiedenen Körpergeweben zu kartieren. Unser Team und viele weitere haben sich zudem im 4D Nucleome Consortium zusammengeschlossen, einem Forschungsprogramm, das die raumzeitliche Organisation des Zellkerns untersucht. Und meine Mitarbeiterin Olga Dudchenko hat mit dem »DNA-Zoo« eine weltweite Kooperation von Universitätsinstituten, Zoos und Aquarien initiiert, die Genomsequenzen von hunderten Spezies zusammentragen möchte, um die Evolution der DNA-Schlaufen nachzuverfolgen.

Für Wissenschaftler folgt auf eine Antwort stets die nächste Frage. Eine der wichtigsten lautet, ob und wie sich die neuen Erkenntnisse in nützliche medizinische Verfahren umsetzen lassen. Und, von ganz grundsätzlichem Interesse, wie mag der Mechanismus der DNA-Schlaufenbildung ursprünglich entstanden sein? Es bleibt noch viel zu tun. ◂

QUELLEN

Cullen, K. E. et al.: Interaction between transcription regulatory regions of prolactin chromatin. Science 261, 1993

Ganji, M.: Real-time imaging of DN loop extrusion by condensin. Science 360, 2018

Rao, S. S. et al.: A 3D map of the human genome at kilobase resolution reveals principles of chromatin looping. Cell 159, 2014

Sanborn, A. L. et al.: Chromatin extrusion explains key features of loop and domain formation in wild-type and engineered genomes. PNAS 112, 2015

Lesen Sie hier den ganzen Artikel:
www.menschenimfocus.de

Fakten schaffen statt Fakes.

Das Leben der Ruth Bader Ginsburg im FOCUS.

LEBEN

Im Obersten Gericht
Mit 85 Jahren ist Ruth Bader Ginsburg derzeit die älteste Richterin. Der Supreme Court entscheidet über gesellschaftliche Fragen wie Abtreibung, Todesstrafe, Homo-Ehe

Fotos: Nikki Kahn/The Washington Post via Getty Images, Sebastian Kim/AUGUST

FOCUS 11/2019

BIOGRAFIE

Amerikas gutes Gewissen

Die 85-jährige Richterin am Obersten Gerichtshof ist eine Ikone des Kampfes für Gerechtigkeit und ein Idol junger Amerikaner. Jetzt feiern ein Spielfilm und eine Doku die Juristin **Ruth Bader Ginsburg**

FOCUS 11/2019

FOCUS 11/2019

Menschen im





ANTARKTIS
EISRIESE VOR DEM KOLLAPS?

Der riesige Thwaites-Gletscher spielt eine Schlüsselrolle bei der Frage, wie schnell das Eis in der Westantarktis schmelzen wird. Sein Verhalten vorherzusagen ist schwierig – auch, weil entscheidende physikalische Abläufe noch unklar sind.

Verena Tang ist Chemikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

spektrum.de/artikel/1640014

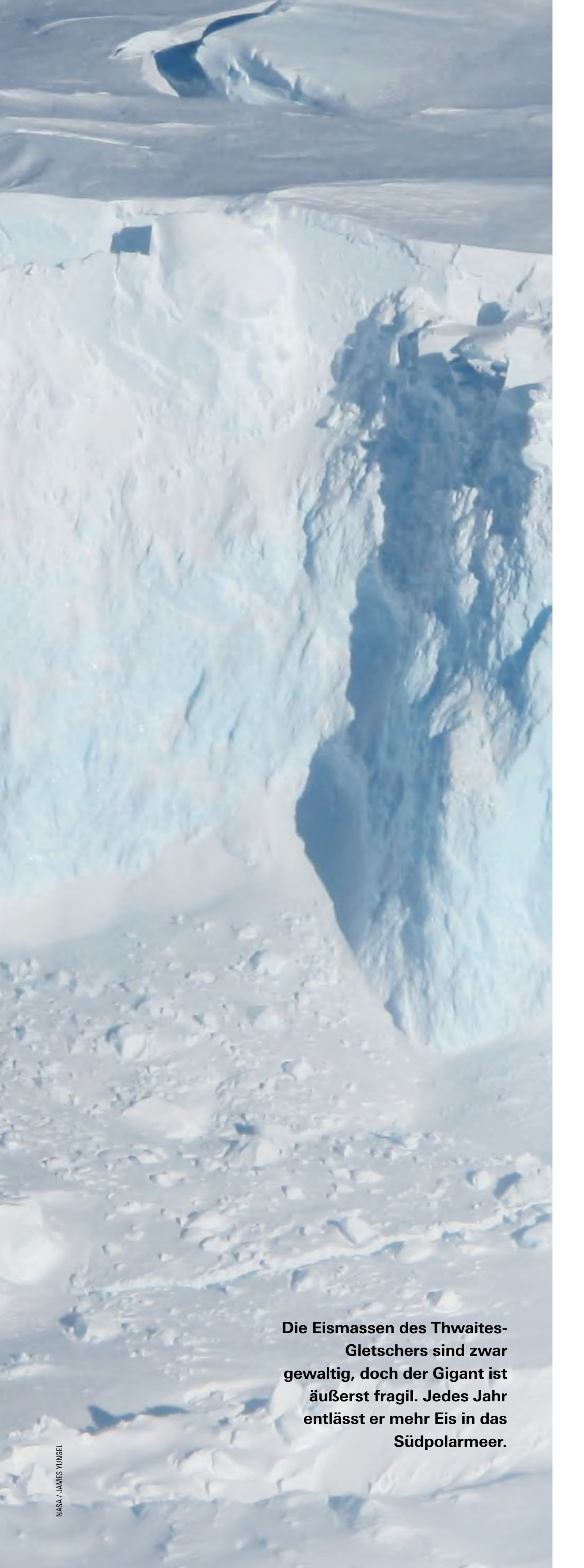
AUF EINEN BLICK
SCHICKSALSGLETSCHER

1. Der enorme Thwaites-Gletscher in der Antarktis strömt seit 2009 immer schneller in Richtung Meer und wird dabei zunehmend dünner.

2. Auf Grund der geologischen Gegebenheiten könnte sich sein Kollaps künftig noch beschleunigen, so dass sich der Riese bis zum Transantarktischen Gebirge zurückzieht.

3. Dann wäre vermutlich der gesamte Westantarktische Eisschild in Gefahr. Ob dies tatsächlich passiert, versuchen Experten mit Hilfe von Messungen und Modellrechnungen vorherzusagen.

NASA / JAMES YUNGEL


Die Eismassen des Thwaites-Gletschers sind zwar gewaltig, doch der Gigant ist äußerst fragil. Jedes Jahr entlässt er mehr Eis in das Südpolarmeer.

NASA / JAMES YUNGEL

Der westantarktische Thwaites-Gletscher ist mit einer Fläche von rund 182000 Quadratkilometern etwa halb so groß wie Deutschland. Schon seit Langem beunruhigt dieser riesige Eisstrom Geologen, denn er ist auch einer derjenigen Gletscher, die am schnellsten ins Meer fließen. Die Folgen seines Zusammenbruchs wären massiv. So gibt der britische Natural Environment Research Council an, dass der Meeresspiegel allein durch den Kollaps von Thwaites und seinem Nachbargletscher Pine Island weltweit im Mittel um mehr als einen Meter steigen könnte.

Bedrohlich wirken darüber hinaus die geologischen Gegebenheiten in dieser Region: Kollabiert Thwaites, könnte der gesamte Westantarktische Eisschild sein Eis ins Meer entlassen und so dessen Spiegel um rund drei Meter anheben. Daher versuchen Forscherinnen und Forscher herauszufinden, wie schnell Thwaites abschmelzen könnte und welche Voraussetzungen dazu erfüllt sein müssen.

Weil sich Eisschilde unter ihrem Eigengewicht ausbreiten, fließen Gletscher an deren Rändern in Richtung Meer und geben Eis durch Schmelzen oder abkalbende Eisberge ab. Solange Schneefälle diesen Eisverlust ausgleichen, behält der Eisschild seine Größe bei. Durch die Erderwärmung geben die Eisschilde und Gletscher weltweit jedoch inzwischen mehr Eis an die See ab, als sie hinzugewinnen. In der Folge dünnen Gletscher aus, ihre Vorderkanten ziehen sich zurück – die Eisschilde schrumpfen, und der Meeresspiegel steigt. Würde das gesamte Antarktiseis schmelzen, stiege der Meeresspiegel weltweit um rund 60 Meter.

Umgeben von schützenden Schelfeisflächen

Die Spitze des Thwaites-Gletschers schiebt sich derzeit mit zirka drei Kilometern pro Jahr in die Amundsen-See. Dabei verliert der Eisstrom immer mehr Masse: zwischen 2002 und 2010 jährlich im Schnitt etwa 54 Gigatonnen. Der Riese befindet sich auf einer Landmasse, die teils weit mehr als 1000 Meter unter dem Meeresspiegel liegt – wie auch der gesamte Westantarktische Eisschild, weshalb man diesen als marinen Eisschild bezeichnet. Wo Thwaites' Eismassen auf das Meer treffen, beginnen sie zu schwimmen, bleiben aber weiterhin mit dem Gletscher an Land verbunden und bilden ein so genanntes Schelfeis. Dieses stützt den Gletscher und bremst ihn wie ein gigantischer natürlicher Sperrriegel. Weite Teile der antarktischen Küste sind von Schelfeisflächen begrenzt. Die größten unter ihnen sind das Ross-Schelfeis mit knapp 500000 und das Filchner-Ronne-Schelfeis mit etwa 443000 Quadratkilometer Fläche.

Setzen warmes Meerwasser und steigende Temperaturen einem Schelf zu, wird es dünner und kleiner. Dadurch verschiebt sich auch die Aufsetzlinie des Gletschers – die Stelle, ab der das Eis nicht mehr auf dem Untergrund aufsitzt und zu schwimmen beginnt – in Richtung Inland. Zwischen 1992 und 2011 hat sich diese Linie beim Thwaites-Gletscher um 15 Kilometer zurückgezogen, beim benachbarten Pine-Island-Gletscher sogar um 30. Wie schnell ein solcher Rückzug stattfindet, hängt von den geologischen Gegebenheiten ab. Das Felsbett unter dem Thwaites-Gletscher liegt nicht nur unter dem Meeresspiegel, es fällt auch noch landeinwärts ab. Das sind optimale Bedingungen für einen Prozess, der in der Fachwelt seit 2007 als »Instabilität mariner Eis-

schilde« (»marine ice-sheet instability«, kurz MISI) bekannt ist. Laut diesem Modell stabilisiert sich ein Gletscher, wenn das Land hinter der Aufsetzlinie wieder ansteigt. Ist der Boden jedoch landeinwärts geneigt, so wird das Eis an der Aufsetzlinie bei einem weiteren Rückzug immer dicker und strömt schneller ins Meer. Dadurch wandert die Front noch rascher landeinwärts, und der Mechanismus verstärkt sich so lange selbst, bis der Boden wieder ansteigt.

Im Fall von Thwaites ist die Lage besonders brisant, denn er »hängt« derzeit noch an einer Art Anhöhe im Meeresboden fest, hinter der der Untergrund immer weiter abfällt, bis zum so genannten Bentley-Subglazialgraben weiter hinter dem Gletscher. Dieser ist mit rund 2500 Metern unter dem Meeresspiegel der tiefste Punkt der Erde, der nicht von einem Ozean bedeckt ist. Insgesamt ist der Eisschild dort mehr als 4000 Meter dick, hier kann also besonders viel Eis schmelzen oder abbrechen, bis der Grund auf der anderen Seite des Grabens wieder ansteigt. Möglicherweise nimmt der Eisstrom richtig Fahrt auf, wenn sich seine Aufsetzlinie erst einmal hinter die Anhöhe zurückgezogen hat, die ihn momentan noch zurückhält.

Der Niedergang des Gletschers könnte sich auch beschleunigen, wenn er sein Schelf verlöre. 2002 sah man direkt, was in solch einem Fall passiert: Auf dem Larsen-B-Schelfeis vor der Antarktischen Halbinsel, das über 10000 Jahre lang relativ stabil gewesen war, hatten sich durch mehrere warme Sommer Schmelzwasserseen gebildet, die große Spalten in das Schelf rissen und einen beträchtlichen Teil von ihm – über 3200 Quadratkilometer Eis – in nur fünf Wochen zerstörten. Nach dem Verlust des großen Schelfs beschleunigte sich der Strom der hinter ihm liegenden Gletscher bis auf die achtfache Geschwindigkeit.

Ohne das schützende Schelf würde der Gletscher nicht nur schneller schrumpfen, seine Abbruchkante wäre auch direkt dem Meer ausgesetzt. Und damit könnte ein weiterer selbstverstärkender Mechanismus einsetzen, die so genannte »marine ice-cliff instability« (MICI), die 2011 erstmals postuliert wurde. Sie kommt zum Tragen, wenn die Abbruchkante eines Gletschers direkt auf das Meer zeigt – etwa, nachdem sein Schelf abgebrochen ist. Solche Abbruchkanten mariner Eisschilde werden laut Theorie instabil und kollabieren unter ihrem Eigengewicht, wenn die Eisfront etwa 1000 Meter dick ist und damit gut 90 Meter hoch über dem Wasser aufragt. Riesenhafte Eisberge – ungleich größer als solche, die man an »gewöhnlichen« Gletschern beobachten kann – stürzen dann wie Dominosteine ins Meer und legen noch höhere Kalbungsfronten frei, wodurch sich der weitere Rückgang des Eisschilds in einer selbstverstärkenden Kettenreaktion beschleunigt. Beim Thwaites-Gletscher wäre dieses Szenario wegen seiner Lage vor dem tiefen Bentley-Subglazialgraben besonders bedrohlich.

Der Mechanismus steht im Zentrum einer Studie, in der die Geologen David Pollard von der Pennsylvania State University und Robert M. DeConto von der University of Massachusetts Amherst im Jahr 2016 untersucht haben, wie schnell das antarktische Eis unter verschiedenen Klimaszenarien schmelzen könnte und wie stark der Meeresspiegel dadurch ansteigen würde. Dazu programmierten sie ein eisdynamisches Modell und optimierten es zunächst so weit, dass es geologische Daten aus der Vergangenheit korrekt reproduzierte.

Eis, das von riesigen Abbruchkanten dominoartig ins Meer stürzt – realistisches Szenario oder Horrorvision?

Bisherige Simulationen, so die Forscher, konnten die hohen Meeresspiegel während des mittleren Pliozäns vor etwa drei Millionen Jahren sowie während des letzten Interglazials, des Eem vor etwa 115000 bis 130000 Jahren, nicht erklären und lieferten daher auch ungenaue Vorhersagen für die Zukunft. Das von ihnen programmierte Modell, das den MICI-Mechanismus berücksichtigte, gab die vergangenen Gegebenheiten korrekt wieder. Auf verschiedene Zukunftsszenarien mit unterschiedlicher Erwärmung angewandt, ergaben ihre Berechnungen erschreckende Vorhersagen. So kamen die Forscher zu dem Ergebnis, dass der Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 allein durch Eisschmelze in der Antarktis um mehr als einen Meter steigen könnte, falls die weltweiten CO_2-Emissionen weiterhin ansteigen wie bisher. Bei moderater Erwärmung würde der gesamte Westantarktische Eisschild bis in rund 500 Jahren zusammenbrechen, hauptsächlich durch Thwaites' Rückzug in tiefere Becken.

Ob hohe marine Kalbungsfronten tatsächlich unter dem postulierten Mechanismus kollabieren, diskutieren Fachleute allerdings kontrovers – unter anderem, weil reale Beobachtungen dazu bisher fehlen. Dass keine Abbruchkanten existieren, die höher als 100 Meter sind, könnte ein indirekter Beweis für die These sein. Als weiteres Indiz gilt manchen das Verhalten des Grönlandgletschers Jakobshavn Isbræ. Seit er in den 1990er Jahren sein Schelfeis verloren hat, kalbt er massiv ins Meer und zieht sich extrem schnell zurück. Seine Abbruchkante liegt mit etwa 90 Meter Höhe über dem Wasser an der Grenze, ab der der Kollaps einsetzen sollte. Ob das Eis aber durch den Mechanismus der MICI zusammenbricht oder andere Prozesse der Grund dafür sind, ist umstritten. Beispielsweise argumentieren Experten, dass seine schnelle Fließgeschwindigkeit für sein rasches Schrumpfen verantwortlich ist, ebenso wie die Tatsache, dass er auf landeinwärts abfallendem Grund sitzt und daher infolge mariner Eisschildinstabilität mehr und mehr zurückweicht – ähnlich wie Thwaites.

Eine Forschungsgruppe um Matthew G. Wise und Julian A. Dowdeswell vom Scott Polar Research Institute der University of Cambridge hat 2017 Hinweise darauf gefunden, dass der postulierte Prozess in der Vergangenheit bereits stattfand. Dazu haben die Wissenschaftler Spuren früherer Eisbergabbrüche auf dem Meeresboden rund um den Pine-Island-Gletscher in der Antarktis ausgewertet. Diese lassen



FOTOLIA / BIG-LABEL

Eisriesen auf dem Rückzug

Die beiden größten Gletscher der Westantarktis, Pine Island und Thwaites, schrumpfen durch anhaltende Eisschmelze immer schneller. Auf Grund seiner Lage vor dem Bentley-Subglazialgraben könnte sich der Thwaites-Gletscher möglicherweise bis zum Transantarktischen Gebirge zurückziehen. Dann könnte der gesamte Westantarktische Eisschild zusammenbrechen.

Zusammenspiel vieler Faktoren

Erhebungen im Meeresboden können den Rückgang des Gletschers kurzzeitig bremsen. Setzt ein Eisschild an solch einer Erhebung auf, verhindert dies, dass warmes Wasser eindringt und den Gletscher von unten schmelzen lässt. Zieht sich der Eisschild weiter zurück, hat das Wasser freien Zugang.

Eisschilde werden von Neuschnee gespeist und breiten sich unter ihrem Eigengewicht aus. An ihren Rändern befördern Gletscher kontinuierlich Eis ins Meer, wo es schmilzt oder abbricht. Derzeit verlieren die Eisschilde in der Westantarktis auf diese Weise mehr Masse, als sie hinzugewinnen.

Schelfeis, das am vorderen Ende des Gletschers auf dem Wasser schwimmt, wirkt wie ein natürlicher Sperrriegel und verlangsamt den Eisfluss. Zerfällt es oder wird es dünner, zieht sich die so genannte Aufsetzlinie, ab der ein Gletscher Kontakt mit dem Meeresboden hat, landeinwärts zurück. Auf abfallendem Untergrund setzt sich dieser Rückzug ungehindert fort, bis das Eis den nächsthöheren Boden erreicht oder an einer Erhebung kurzzeitig zum Halten kommt. Währenddessen steigt der Meeresspiegel.

darauf schließen, dass während dessen letztem Rückzug keine großen Tafeleisberge abbrachen, wie man sie heute kennt, sondern kleinere mit spitzen Kielen. Form und Verteilung der Spuren deuten auf Kalbungsfronten hin, deren Höhe dem Schwellenwert entspricht, ab dem die Eisfront unter ihrem Eigengewicht zusammenbricht. Die Forscher nehmen an, dass sich der Gletscher rasch zurückgezogen hat und dadurch der gesamte Eisschild stark geschrumpft ist – ein Prozess, der vor rund 12 300 Jahren begann und vor etwa 11 200 Jahren abgeschlossen war.

Ob und wie viel MICI künftig zum Abschmelzen der Eisschilde beitragen wird, ist weiterhin unklar. Eine Gruppe um die Klimaforscherin Tasmin L. Edwards vom King's College in London hat nun jedoch das Modell von Pollard und DeConto anhand einer statistischen Analyse auf eine breitere Datenbasis gestellt und die Risiken neu berechnet. Neben einem Abgleich mit Daten aus der Vergangenheit hat das Team auch aktuelle Satellitendaten in seine Modellierungen mit einbezogen. »Mit dieser Methode schätzen wir im Endeffekt ab, was in der Studie aus dem Jahr 2016 herausgekommen wäre, nur mit mehr Rechenleistung, einem Abgleich mit Satellitendaten und einer Berücksichtigung von Fehlern im Modell«, schreiben die Autorinnen und Autoren in ihrer im Februar 2019 veröffentlichen Arbeit. Sie kommen zu dem Schluss, dass der geschätzte antarktische Eisverlust in den oben genannten Warmperioden sowie in den Jahren zwischen 1992 und 2017 auch ohne den speziellen MICI-Mechanismus erklärbar ist.

Weder bewiesen noch widerlegt

Sowohl mit als auch ohne MICI konnten sie die Meeresspiegel in diesen Zeiträumen reproduzieren, so dass sich weder bestätigen noch ausschließen ließ, ob dieser Vorgang in der Vergangenheit eine Rolle gespielt hat. Entsprechend haben die Forscher berechnet, wie stark der Meeresspiegel mit und ohne dessen Einfluss unter verschiedenen Emissionsszenarien in den kommenden Jahrzehnten möglicherweise steigt. Ihre Analysen ohne den Prozess stimmen gut mit bisherigen Studien zum Meeresspiegelanstieg bis 2100 überein. So liegt nach ihren Berechnungen die Wahrscheinlichkeit, dass das Wasser bis dahin um mehr als 30 bis 40 Zentimeter steigt, nur bei fünf Prozent, und zwar in einem Worst-Case-Szenario, dem hohe CO_2-Emissionen zu Grunde liegen. In Szenarien mit niedrigen Emissionen steigt der Meeresspiegel mit 95 Prozent Wahrscheinlichkeit um weniger als 10 bis 20 Zentimeter. Aber auch mit MICI kommen die Autoren auf einen Anstieg von »nur« 45 Zentimetern bis 2100. Das Modell von Pollard und DeConto überschätzt laut der Studie den Beitrag der Antarktis zum Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 systematisch. Die Autoren empfehlen, für eine bessere Vorhersage in Zukunft verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Ansätzen koordiniert und zeitgleich auszuwerten. Nach ihrer Ansicht bleibt die Frage, ob MICI existiert oder nicht, die größte Unsicherheit in Bezug auf den Meeresspiegelanstieg in diesem Jahrhundert.

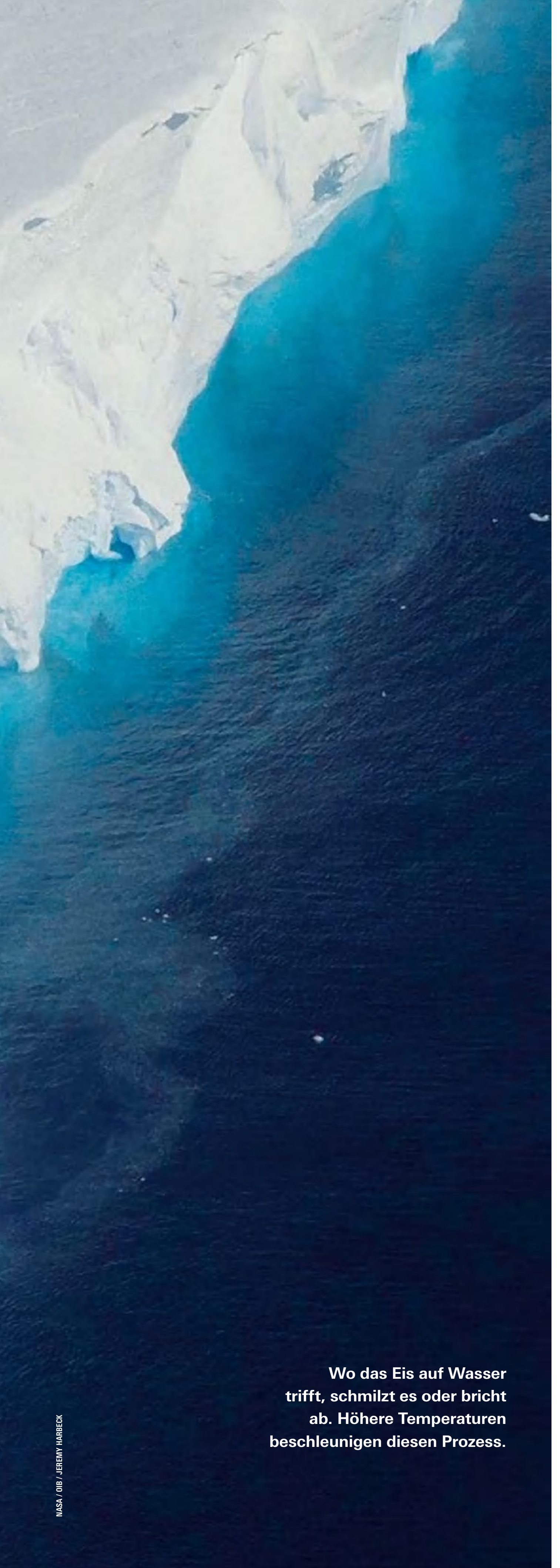
Aber auch DeConto und Pollard haben ihre Simulation von 2016 inzwischen verfeinert und die Ergebnisse im Dezember 2018 beim »Fall Meeting« der American Geophysical Union präsentiert. In Übereinstimmung mit der neuen Studie


NASA / OIB / JEREMY HARBECK

aus London ziehen sie den Schluss, dass der Effekt der in sich zusammenbrechenden Kalbungsfronten bis zum Jahr 2100 nicht so stark zum Tragen kommt.

Ob hohe Abbruchkanten den Rückgang der Eisschilde stark beschleunigen oder nicht: Das Abschmelzen des Polareises beeinflusst wiederum das Klima. Weil Eisschilde sich um Größenordnungen langsamer verändern als beispielsweise die Atmosphäre oder die Ozeane, wird ihr Einfluss auf das Klima in Simulationen bislang jedoch nicht berücksichtigt. Ein Team um Nicholas R. Golledge vom Antarctic Research Centre der Victoria University of Wellington in Neuseeland hat nun herausgefunden, dass sich das Verschwinden des Eises recht bald auf die Meere und das Klima auswirkt – und zwar durch den Eintrag von Schmelzwasser in die Ozeane, wie die Forscher im Februar 2019 im Fachblatt »Nature« schreiben. In der nördlichen Hemisphäre verlangsamt der höhere Schmelzwassereintrag zwischen 2050 und 2100 die atlantische meridionale Umwälzbewegung (AMOC), ein großes System von Meeresströmungen, die warmes Wasser aus den Tropen in nördlichere Breiten befördern. In der Antarktis hingegen halten die kalten Wassermassen aus dem Südlichen Ozean warmes Wasser an der Oberfläche »gefangen«, wo dieses das Eis schneller schmelzen lässt. Bis 2100 werden laut diesen Berechnungen dadurch 50 Prozent mehr Eis schmelzen als bisher vorhergesagt, und die Temperaturschwankungen auf unserem Planeten werden zunehmen. Das Abschmelzen der Polkappen verstärkt sich über seine Klimawirkung also quasi selbst.

Da der Thwaites-Gletscher offenbar eine Schlüsselrolle spielt und immer noch zahlreiche Rätsel birgt, haben der britische Natural Environment Research Council und die amerikanische National Sciene Foundation im Oktober 2018 die International Thwaites Glacier Collaboration ins Leben gerufen. Über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus verschiedenen Ländern, darunter Experten des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven, untersuchen innerhalb der nächsten fünf Jahre beispielsweise die Beschaffenheit des felsigen Untergrunds, die Oberfläche und das Innenleben des Gletschers, seine Bewegung in Richtung Meer, die dort herrschenden Wetterbedingungen und Meeresströmungen, Prozesse an der Kalbungsfront des Eisschelfs sowie die Vorgänge an der Aufsetzlinie. So wollen sie die vielschichtigen Fragen, die der Gigant aufwirft, weiter aufklären und damit die Grundlage für bessere Prognosen schaffen. ◂



Wo das Eis auf Wasser trifft, schmilzt es oder bricht ab. Höhere Temperaturen beschleunigen diesen Prozess.

NASA / OIB / JEREMY HARBECK

QUELLEN

DeConto, R.M., Pollard, D.: Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. Nature 531, 2016

Edwards, T.L. et al.: Revisiting Antarctic ice loss due to marine ice-cliff instability. Nature 566, 2019

Golledge, N.R. et al.: Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt. Nature 566, 2019

Scambos, T.A. et al.: How much, how fast?: a science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites glacier in the 21st century. Global and Planetary Change 153, 2017

Wise, M.G. et al.: Evidence of marine ice-cliff instability in Pine Island Bay from iceberg-keel plough marks. Nature 550, 2017

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
EXPERIMENTE MIT KOHLENSTOFFDIOXID

Wichtigen Eigenschaften des »Klimakillers« CO_2 kann man mit erstaunlich einfachen Experimenten auf die Spur kommen.




Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

spektrum.de/artikel/1640018

Bei dem Begriff »Kohlenstoffdioxid« denken die meisten vermutlich sofort an den Treibhauseffekt und dessen Folgen, wie den Anstieg des Meeresspiegels und Extremwetterlagen. Untrennbar verbunden ist mit dem Wort auch das Thema fossile Brennstoffe. Nützliche, ja unentbehrliche Funktionen dieses Gases, beispielsweise seine Rolle bei der Fotosynthese, werden dabei häufig vergessen. Zudem besitzt das Molekül eine Reihe interessanter Eigenschaften und ist eine dankbare Quelle für einfache, spannende Versuche.

Als Entdecker des Kohlenstoffdioxids gilt der schottische Chemiker und Physiker Joseph Black (1728–1799). Er erhitzte Kalk (Calciumcarbonat) sowie Magnesia (Magnesiumcarbonat) und stellte fest, dass die beiden Stoffe dabei ein Gas abgeben und gleichzeitig einen Massenverlust erleiden. Chemiker formulieren diese Prozesse wie folgt (dabei steht das Symbol »s« für »fest«, »g« steht für »gasförmig«):

$$CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO_2(g)$$

sowie

$$MgCO_3(s) \rightarrow MgO(s) + CO_2(g)$$

Calciumcarbonat/Magnesiumcarbonat → Calciumoxid/Magnesiumoxid + Kohlenstoffdioxid

Black erkannte, dass sich dasselbe Gas bildet, wenn man Magnesia oder Kalk mit Säuren übergießt. Das ist übrigens auch der Grund dafür, weshalb man niemals Essigreiniger auf Marmor verwenden sollte, denn dieser ist ein Gemisch aus Calciumcarbonaten und Calcium-Magnesiumcarbonat und wird durch die Essigsäure angegriffen. Die chemische Reaktion, die hierbei abläuft, lautet (hier steht »aq« für »in Wasser gelöst«, »l« für »flüssig«):

$$CaCO_3(s) + 2\ H_3O^+(aq) \rightarrow Ca^{2+}(aq) + CO_2(g) + 3\ H_2O(l)$$

beziehungsweise

$$MgCO_3(s) + 2\ H_3O^+(aq) \rightarrow Mg^{2+}(aq) + CO_2(g) + 3\ H_2O(l)$$

Calciumcarbonat/Magnesiumcarbonat + Oxoniumionen → Calciumion/Magnesiumion + Kohlenstoffdioxid + Wasser

Außerdem wies Black Kohlenstoffdioxid im Rauch einer brennenden Kerze, über Gärbottichen und in ausgeatmeter Luft nach. Der englische Chemiker Henry Cavendish (1731–1810), ein spleeniger Aristokrat, dem die Chemie des 18. Jahrhunderts wohl ihre größten Erfolge verdankte, stellte weitere Untersuchungen mit diesem Gas an, welches er fixierte Luft (»fixed air«) nannte. Im deutschsprachigen Raum wurde damals auch häufig die Bezeichnung »fixe Luft« gewählt. Mäuse, Spinnen und Fliegen verendeten in dieser nach wenigen Minuten. Eine Kerzenflamme brannte umso kürzer, je höher der Anteil an fixer Luft in einem geschlossenen Glasgefäß war. Betrug er mehr als elf Prozent, erlosch sie sofort. Die wichtigste Entdeckung war, dass die fixe Luft eine erheblich höhere Dichte als normale Luft besitzt. Diese Erkenntnis nutzte Cavendish als Möglichkeit, die damals bekannten Gase durch Bestimmung ihres jeweiligen spezifischen Gewichts voneinander zu unterscheiden. Bevor sich jedoch die genaue Zusammensetzung von Kohlenstoffdioxid klären ließ, galt es noch, das Rätsel der legendären »Feuerluft« zu lösen: Joseph Priestly (1733–1804) und Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) hatten ein Gas gefunden, in dem

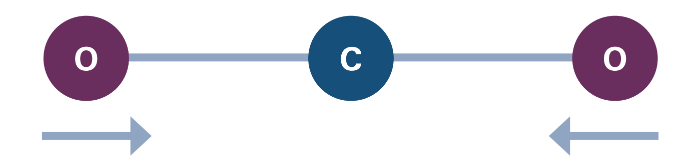
eine Kerze länger und heller brannte als an der normalen Luft und welches das Leben von Vögeln in abgeschlossenen Behältern verlängerte. Dieses geheimnisvolle Gas war der Sauerstoff. De Lavoisier fand heraus, dass Kohlenstoff mit Sauerstoff fixe Luft bildet, womit er deren Zusammensetzung entschlüsselte. Durch quantitative Versuche konnte er bereits das Atomzahlenverhältnis im Kohlenstoffdioxid bestimmen und dessen chemische Formel mit CO_2 korrekt angeben.

Warum Kohlenstoffdioxid ein Treibhausgas ist
Das Kohlenstoffdioxid-Molekül ist linear aufgebaut und besitzt zwei Doppelbindungen zwischen dem Kohlenstoffatom und den beiden Sauerstoffatomen:

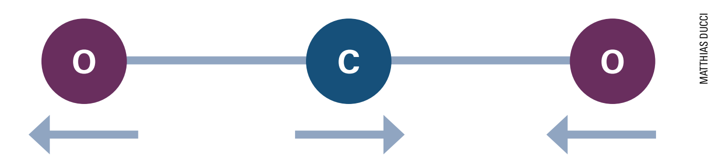
$O{=}C{=}O$

Der Stoff ist farblos, das heißt, er absorbiert nicht im sichtbaren Bereich des Lichtspektrums. Dagegen nimmt er Licht im Infrarotbereich auf, genauer in den Bereichen zwischen 4 und 15 Mikrometern, was für den Wärmehaushalt der Erde von großer Bedeutung ist. Durch diese Absorption verhindern die CO_2-Moleküle in der Atmosphäre nämlich, dass Wärme ungehindert von der Erde in den Weltraum abgestrahlt wird – sie speichern diese Energie. Die Erhöhung des Kohlenstoffdioxid-Anteils in der Luft durch die Industrialisierung ist daher eine Ursache für den Klimawandel, der sich aktuell vollzieht. Während er im vorindustriellen Zeitalter bei etwa 0,028 Prozent und noch Ende der 1950er Jahre unter 0,032 Prozent lag, hat er im April 2018 erstmals im monatlichen Mittel den

Die Sauerstoffatome schwingen gleichmäßig entlang der Bindungsachse hin und her. Weil das CO_2-Molekül dabei seine Symmetrie beibehält, sprechen Chemiker von einer symmetrischen Valenzschwingung. Sie wird nicht durch Infrarotstrahlung (IR) angeregt.

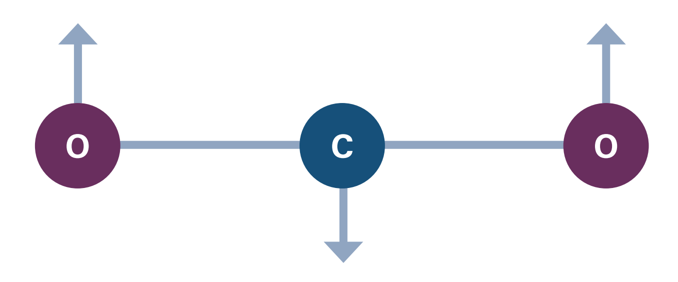


Bei der asymmetrischen Valenzschwingung schwingen alle Atome entlang der Bindungsachse so, dass die Molekülsymmetrie verloren geht. Diese Bewegung wird durch Infrarotstrahlung bei etwa 4 Mikrometern aktiviert.



MATTHIAS DUCCI

Bewegen sich die Atome senkrecht zur Bindungsachse, spricht man von Deformationsschwingung. Infrarotstrahlung bei 15 Mikrometern regt diese an.



Einfacher Kohlenstoffdioxid-Nachweis: In farbloses, klares Kalkwasser (links) wird ausgeatmete Luft geleitet (Mitte). Dabei entsteht der weiße Feststoff Kalk und trübt nach rund 30 Sekunden die Lösung (rechts).

MATTHIAS DUCCI



Wert von 0,041 Prozent überschritten. Das klingt nach wenig, bedeutet aber einen Anstieg von mehr als 46 Prozent verglichen mit dem Wert vor der Industrialisierung. Die »wenigen« CO_2-Teilchen in der Atmosphäre haben einen riesigen Einfluss auf das Klima auf unserem Planeten.

Doch wie genau absorbiert das Gas die Infrarotstrahlung? Im Prinzip können wir uns das CO_2-Molekül modellhaft als drei Kugeln vorstellen, die über Federn miteinander verbunden sind. Die Atome können hin- und herschwingen, wobei man zwei Typen von Schwingungen unterscheidet, wie die Abbildung auf S. 47 oben zeigt: symmetrische, bei denen sich die Atome so gegeneinander bewegen, dass das Molekül seine Symmetrie zu jedem Zeitpunkt behält, und asymmetrische, bei denen es diese kurzzeitig verliert. Letztere werden durch die Absorption von Infrarotstrahlung ausgelöst.

Solche asymmetrischen Schwingungen können nur Stoffe ausführen, welche aus zwei verschiedenen Atomsorten oder aus mehr als zwei Atomen bestehen. Daher sind die zweiatomigen Moleküle Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) als Hauptbestandteile unserer Atmosphäre keine Treibhausgase.

Die Kohlenstoffdioxid-Teilchen speichern die aufgenommene Energie in Form von Schwingungen und geben sie (unter geringen Verlusten) als Wärme wieder ab. Das geschieht durch Kollisionen mit anderen Luftmolekülen, in erster Linie also mit Sauerstoff und Stickstoff, die quasi als Wärmeüberträger fungieren. Je mehr Wärme speicherndes CO_2 sich in der Atmosphäre befindet, desto mehr heizt sich diese folglich auf.

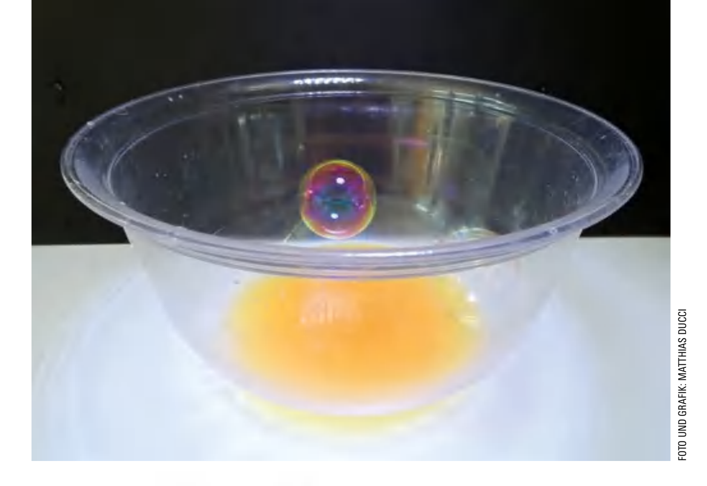
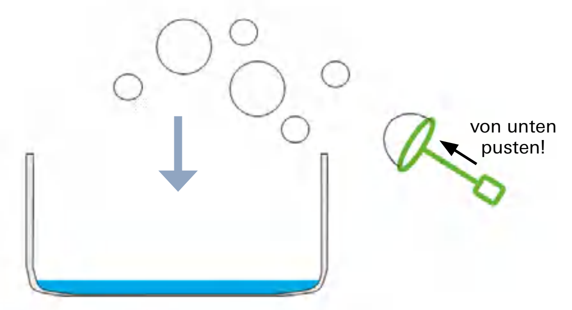


FOTO UND GRAFIK: MATTHIAS DUCCI



Um schwebende Seifenblasen zu erhalten, pustet man diese von unten über eine Schüssel, in der zuvor Kohlenstoffdioxid erzeugt wurde. Ruhende Seifenblasen schweben dann auf einem unsichtbaren Polster aus Kohlenstoffdioxid (Foto).

Die Katastrophe am Nyos-See

In der Natur kommt Kohlenstoffdioxid in freiem Zustand nicht nur in der Atmosphäre, sondern auch gelöst in Meerwasser vor. In einigen Gegenden, vor allem in der Nähe von Vulkanen, strömt es aus Rissen und Spalten des Erdbodens aus. Eine derartige Freisetzung von CO_2 führte am 21. August 1986 zu einer Tragödie: Im Umfeld des Nyos-Sees, eines 200 Meter tiefen Kratersees in der Vulkanregion im Westen Kameruns, starben innerhalb weniger Stunden fast 1800 Menschen und Tausende anderer Lebewesen. Was war passiert? Einige Überlebende wollen ein Blubbern aus Richtung des Sees gehört haben, andere berichteten von einer Wolke aus Schaum, die aus dem Gewässer emporstieg. Als Geophysiker Tiefenwasserproben nahmen und diese dem atmosphärischen Druck aussetzten, sprudelte Gas daraus hervor – Kohlenstoffdioxid. Damit wussten sie, wie sich die Katastrophe abgespielt hatte: Aus dem Erdmantel strömt das farb- und geruchlose Gas in das Tiefenwasser des Sees. Dort herrschen tiefe Temperaturen und ein hoher Druck, und unter diesen Bedingungen löst sich darin ungleich mehr CO_2 als in wärmerem Wasser unter Atmosphärendruck. Nun hat der Nyos-See die Besonderheit, dass er thermisch geschichtet ist, das heißt, warmes Wasser an der Oberfläche vermischt sich nicht mit dem kalten in den Tiefen des Sees. Darum reichert sich dort immer mehr CO_2 an. Möglicherweise kam es dann zu einem Erdrutsch oder einem kleinen Erdbeben, wodurch sich die Wasserschichten vermischten und kohlenstoffdioxidreiches Wasser plötzlich in Richtung Oberfläche gelangte. Der damit verbundene Druckabfall setzte schlagartig eine gigantische Menge CO_2 frei. Denselben Effekt beobachten wir im Alltag beim Öffnen von Mineralwasserflaschen. Das Gas breitete sich im Umland des Sees aus und erstickte alle Lebewesen. Denn weil Kohlenstoffdioxid schwerer als Luft ist, verflüchtigt es sich nicht, sondern bildet über dem Boden eine Schicht. Noch in 23 Kilometern Entfernung drohte am darauf folgenden Tag der Erstickungstod. Um die Gefahr weiterer solcher Unfälle zu bannen, wird das Gas inzwischen vom Seegrund durch ein Rohrsystem nach oben abgeleitet.

Kohlenstoffdioxid aus geologischen Aktivitäten kann sich auch in Grotten und Höhlen anreichern. Ein bekanntes Beispiel ist die Grotta del Cane (deutsch: Hundsgrotte) in der Nähe von Neapel. Ein Besuch in der Höhle ist nur für Hunde und andere sich bodennah fortbewegende Tiere lebensgefährlich. Sie werden in der Grotte schnell bewusstlos und sterben nach wenigen Minuten, wenn man sie nicht wieder rechtzeitig an die frische Luft befördert. Hingegen können Menschen die Grotte vergleichsweise gefahrlos betreten, sofern sie eine bestimmte Körpergröße besitzen, die über die CO_2-Schicht reicht.

Nützlich im Labor und im Alltag

Technisch wird Kohlenstoffdioxid sehr vielfältig verwendet. In der Industrie dient es als Schutzgas bei chemischen Prozessen, als Treibgas bei der Schaumstoffherstellung und als Kühlmittel im Labor. Großtechnisch wird es unter

anderem zur Produktion von Harnstoff, Methanol und Soda verwendet. Im Alltag begegnet uns der Stoff als Treibgas in Sprays sowie als Löschmittel in Feuerlöschern. Bei der Herstellung von Erfrischungsgetränken wird das farblose Gas unter hohem Druck in die Flüssigkeit gepresst. Diese über 200 Jahre alte Erfindung verdanken wir dem oben erwähnten Joseph Priestly, der die Löslichkeit verschiedener Gase in Wasser untersuchte. In Mineralwasser liegen 99 Prozent der Kohlenstoffdioxid-Moleküle gelöst als $CO_2(aq)$ vor. Das bedeutet, dass nur ein Prozent von ihnen mit Wasser reagiert und das folgende Gleichgewicht ausbildet:

$$CO_2(aq) + 2\ H_2O \rightarrow HCO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$$

Kohlenstoffdioxid + Wasser → Hydrogencarbonation + Oxoniumion

Im festen Zustand wird Kohlenstoffdioxid als Trockeneis bezeichnet, da es beim Erwärmen unter Normaldruck nicht schmilzt, sondern bei mehr als minus 78,48 Grad Celsius direkt gasförmig wird (sublimiert). In dieser Form dient es medizinischen Zwecken, unter anderem der Warzenentfernung, oder zur Kühlung in chemischen Labors. In New York und einigen anderen US-amerikanischen Städten wird Trockeneis seit 2018 zur Bekämpfung von Ratten eingesetzt.

Faszinierende Experimente zur Ergründung einiger Eigenschaften

Kohlenstoffdioxid kann man mit einfachen Mitteln nachweisen. Die folgende Methode geht auf die Untersuchungen seines Entdeckers Joseph Black zurück. Wie oben beschrieben erhitzte er Calciumcarbonat und erhielt daraus CO_2 und Calciumoxid. Das Calciumoxid löste er daraufhin in Wasser. Als er in diese Lösung (von Chemikern als Kalkwasser bezeichnet) Kohlenstoffdioxid einleitete, beobachtete er, dass sich ein weißer Niederschlag bildete. Diesen identifizierte er als die Ausgangssubstanz seiner Versuchsreihe, nämlich als Calciumcarbonat. Während der beiden Reaktionen laufen folgende Prozesse ab:

$$CaO(s) + H_2O(l) \rightarrow Ca^{2+}(aq) + 2\ OH^-(aq)$$

Lösen von Calciumoxid in Wasser: Calciumoxid + Wasser → Calciumion + Hydroxidionen

$$Ca^{2+}(aq) + 2\ OH^-(aq) + CO_2(aq) \rightarrow CaCO_3(s) + H_2O(l)$$

Einleiten von CO_2 in Kalkwasser: Calciumion + Hydroxidionen + Kohlenstoffdioxid → Calciumcarbonat + Wasser

Kalkwasser kann man mit handelsüblichem Blitzzement, der Calciumoxid enthält, aus dem Baumarkt herstellen. Hierzu verrührt man zwei Esslöffel davon in einem Kunststoffbecher mit etwa 250 Millilitern Wasser. Nachdem sich die Aufschlämmung abgesetzt hat, filtriert man das Gemisch durch zwei ineinandergesteckte Kaffeefilterpapiere ab. Das Filtrat sollte klar sein. Jeweils 10 bis 20 Milliliter der Lösung können nun als Testflüssigkeit dienen. So kann beispielsweise mittels einer Ballonpumpe Luft hineingeleitet werden. Der CO_2-Anteil der Luft ist jedoch zu gering, um in der Lösung einen Niederschlag zu bilden. Anders verhält es sich, wenn man ausgeatmete Luft mittels eines



Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M. A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Verena Leusch (Volontärin), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741

Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich. Ansprechpartnerin: Anja Väterlein, E-Mail: anja.vaeterlein@iqm.de

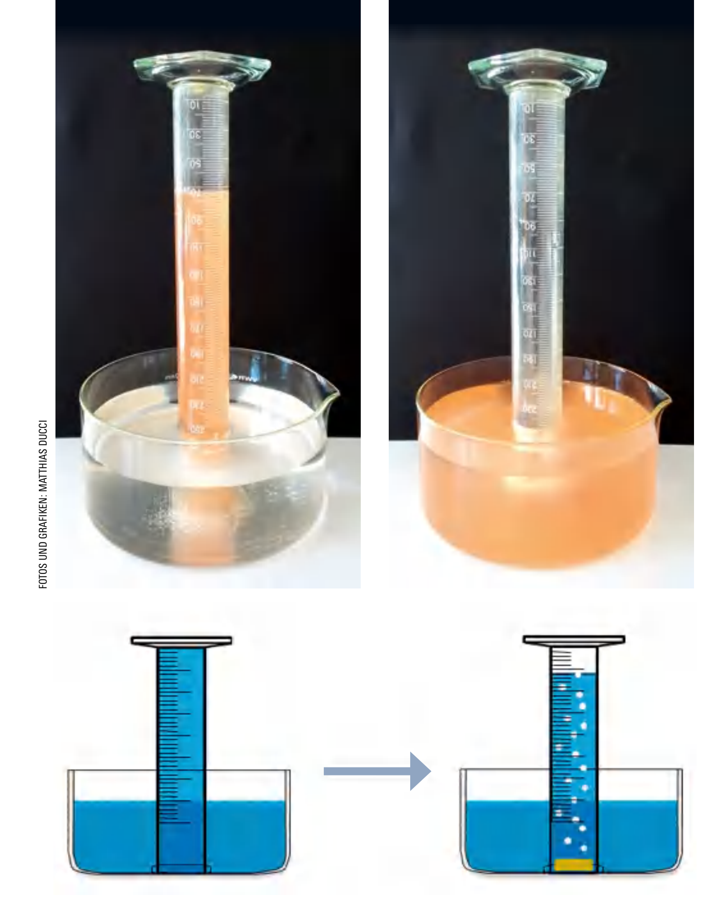
Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, Tel.: 06221 9126-733 E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1. 1. 2019.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



Beim Versuch »Das Gas ist futsch!« sammelt sich das von der Brausetablette freigesetzte Kohlenstoffdioxid im Messzylinder (Grafik). Nach dem Auflösen der ersten Brausetablette werden 70 Milliliter Kohlenstoffdioxid aufgefangen (Foto oben links). Vermeintlich entsteht beim Auflösen der zweiten Tablette deutlich mehr CO_2 (oben rechts). Tatsächlich hat sich jedoch ein Großteil der ersten Portion in Wasser gelöst, bis dieses mit dem Gas gesättigt war. Da das Wasser nun kein Kohlenstoffdioxid mehr aufnehmen kann, wird das von der zweiten Tablette freigesetzte CO_2 vollständig als Gas aufgefangen.

Strohhalms durch das Kalkwasser perlen lässt. Innerhalb von etwa 30 Sekunden entsteht der Feststoff Calciumcarbonat und trübt die Lösung (siehe das Foto auf S. 47, Mitte): Die Luft, die wir ausatmen, enthält rund vier Prozent Kohlenstoffdioxid.

Eine gute CO_2-Quelle für die weiteren Versuche sind handelsübliche Brausetabletten. Sie enthalten unter anderem Zitronensäure und Natriumhydrogencarbonat. Beim Lösen einer Tablette in Wasser entsteht durch die folgende Reaktion Kohlenstoffdioxid:

$$HCO_3^-(aq) + H_3O^+(aq) \rightarrow CO_2(g) + 2\ H_2O(l)$$

Hydrogencarbonation + Oxoniumion (aus der Zitronensäure) → Kohlenstoffdioxid + Wasser

Dieses lässt sich wieder mit einer Portion Kalkwasser nachweisen. Hierzu zerkleinert man zwei bis drei Tabletten, gibt sie in eine leere 0,5-Liter-Flasche und fügt etwas Wasser hinzu. Die Flasche wird mit einem durchbohrten Stopfen verschlossen, in dem ein Schlauch steckt. Mit dessen Hilfe leitet man das entstehende Gas in Kalkwasser. Dieses trübt sich sogleich, da die Brausetabletten beim Auflösen CO_2 freisetzen.

Die erstickende Wirkung des Klimagases, die den Menschen am Nyos-See zum Verhängnis wurde, zeigt das folgende Experiment: In einem 250-Milliliter-Glas löst man drei Brausetabletten in zirka 20 Millilitern Wasser auf. Das Glas deckt man dabei lose mit einem Stück Pappe ab. In einem zweiten Glas wird ein Teelicht entzündet. Nachdem die Tabletten vollständig gelöst sind, nimmt man die Pappe vorsichtig ab und gießt den gasförmigen Inhalt in das Glas mit der Kerze. Hierbei soll nicht die Flüssigkeit umgegossen werden! Die Kerzenflamme erlischt wie von Geisterhand. Dieses Experiment verdeutlicht nicht nur die erstickende Wirkung von Kohlenstoffdioxid, sondern offenbart auch dessen hohe Dichte.

Letztere zeigt sich ebenfalls in einem weiteren beeindruckenden Versuch. Hierzu füllt man eine Kunststoffschüssel (zum Beispiel eine Salatschüssel mit zirka 24 Zentimetern Durchmesser und 10 Zentimetern Höhe) etwa einen Zentimeter hoch mit Wasser. Anschließend werden zehn Brausetabletten hineingelegt, und die Schüssel wird mit dem Deckel oder einer Pappe lose abgedeckt (wegen der Druckentwicklung nicht fest verschließen!). Nachdem sich die Tabletten vollständig aufgelöst haben, nimmt man den Deckel vorsichtig ab. Nun pustet man Seifenblasen von unten so über die Schüssel, dass sie in diese hinabsinken (Abbildung S. 48 – nicht direkt in die Schüssel pusten).

Verblüffend: Die Seifenblasen fallen nicht in die Lösung und zerplatzen, sondern schweben einige Zentimeter über der Oberfläche. Denn das Kohlenstoffdioxid bildet in der Schüssel ein unsichtbares Polster für die mit Luft gefüllten, leichteren Seifenblasen.

Für den letzten Versuch mit dem Titel »Das Gas ist futsch!« benötigt man eine große Glasschale, einen 250-Milliliter-Messzylinder und zwei Brausetabletten. Die Glasschale wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt, der Messzylinder vollständig. Dann stellt man ihn mit der Öffnung nach unten in die Schale, wobei man ihn mit der Hand verschließt, damit möglichst wenig Wasser ausläuft. Nun wird eine Brausetablette rasch unter den Messzylinder gebracht. Das entstehende Kohlenstoffdioxid sammelt sich in Messzylinder. Nachdem sich die Tablette vollständig aufgelöst hat, zeigt die Skala an, dass rund 70 Milliliter CO_2 entstanden sind (Skizze oben).

Anschließend legt man eine zweite Brausetablette unter den Messzylinder und liest das Gasvolumen erneut ab. Welchen Wert würde man erwarten – das Doppelte des ersten? Weit gefehlt! Nach dem Auflösen der zweiten Tablette befinden sich mehr als 250 Milliliter Gas im Messzylinder (rechtes Foto oben).

Woran liegt das? In Wasser kann sich vergleichsweise viel Kohlenstoffdioxid lösen. Bei Raumtemperatur und unter Normaldruck nimmt ein Liter Wasser bis zu 1700 Milligramm davon auf, hingegen nur 9 Milligramm Sauerstoff und 20 Milligramm Stickstoff. Beim Zersetzen der ersten Tablette löst sich daher ein Großteil des entstehenden Gases im Wasser. Danach ist dieses nahezu daran gesättigt, so dass das von der zweiten Tablette freigesetzte CO_2 fast vollständig als Gas aufgefangen wird. ◂



FREISTETTERS FORMELWELT
TÄUSCHEND EINFACH

Ganze Zahlen scheinen simpel – doch auch sie enthalten die volle Komplexität der mathematischen Welt.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

spektrum.de/artikel/1640020

Gegen Ende meines Astronomiestudiums habe ich einmal einen Vortrag über »diophantische Gleichungen« gehört. Zunächst war ich ein wenig besorgt, da der Vortragende bekannt für seine komplizierten Themen war. Als er die erste Formel an die Tafel schrieb, gab sich das schnell:

$$x^2 - dy^2 = 1$$

Das sah gar nicht kompliziert aus, und es kam noch besser: Bei diophantischen Gleichungen, so erklärte mein Kollege, geht es nur um ganze Zahlen. In der obigen Formel muss d also ganzzahlig sein, genauso wie die Lösungen x und y.

Doch dann wurde es rasch komplizierter. Denn auch ganze Zahlen haben es in sich. Sie erscheinen zwar intuitiv am einfachsten, schließlich lernt man sie schon in der Grundschule kennen. Trotzdem ermöglichen sie komplexe Berechnungen. Das wusste bereits Diophantos von Alexandria vor mehr als 2000 Jahren – der Mathematiker aus der griechischen Antike ist der Namensgeber solcher Art von Gleichungen. Die spezielle Formel, die am Beginn des Seminarvortrags (und auch dieses Artikels) stand, hat allerdings eine noch längere Geschichte.

Bereits im 5. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung beschäftigten sich die Schüler von Pythagoras mit einem Spezialfall dieser Gleichung, bei dem $d = 2$ ist. Sie interessierten sich vor allem für ihre Verbindung zur Wurzel aus zwei. Denn wenn x und y ganze, positive Zahlen sind, dann lässt sich zeigen, dass der Bruch x/y eine gute Annäherung an den Wert der Wurzel aus zwei ist. Indische Mathematiker kamen später zu demselben Ergebnis und nutzten die Gleichung, um immer bessere Approximationen zu finden.

Obige Gleichung taucht auch im berühmten »Rinderproblem des Archimedes« auf, bei dem man auf die Anzahl der Tiere einer Herde aus mehreren Nebenbedingungen schließen soll. Diese Aufgabe beschäftigte Mathematiker bis in die Moderne hinein.

Heute ist die Formel als »pellsche Gleichung« bekannt, nach dem englischen Mathematiker John Pell, der mit der Sache jedoch überraschend wenig zu tun hat. Er arbeitete zwar mit diophantischen Gleichungen; doch es war Pierre de Fermat, der eine Lösung für die nach Pell benannte Formel suchte. Der Engländer war bloß der Übersetzer eines Buchs, in dem eine der Lösungen diskutiert wurde. Leonhard Euler sah ihn fälschlicherweise als Urheber an, weswegen er ihr seinen Namen gab.

Die ganze Verwirrung hätte man sich sparen können, wenn man ein wenig genauer auf das geschaut hätte, was die indische Mathematik bereits Jahrhunderte zuvor hervorgebracht hat: Schon im siebten Jahrhundert nach Christus entdeckte der Astronom und Mathematiker Brahmagupta eine allgemeine Methode, um die unendlich vielen Lösungen der pellschen Gleichung zu berechnen.

Für diese spezielle Formel gibt es also einen bekannten Lösungsweg. Das ist bei diophantischen Gleichungen jedoch nicht immer der Fall. Im Jahr 1900 stellte David Hilbert beim Internationalen Mathematikerkongress in Paris seine berühmten 23 Probleme vor, die er für die wichtigsten ungelösten Fragen der Disziplin hielt. Sein zehntes Problem lautete: »Man gebe ein Verfahren an, das für eine beliebige diophantische Gleichung entscheidet, ob sie lösbar ist.«

Es dauerte 70 Jahre, bis der russische Mathematiker Juri Wladimirowitsch Matijassewitsch herausfand: Ein solches Verfahren existiert nicht. Er konnte zeigen, dass die Frage nach der Lösbarkeit diophantischer Gleichungen unentscheidbar ist. Es wird also immer diophantische Gleichungen geben, die nicht nur keine Lösung haben, sondern deren Unlösbarkeit sich nicht einmal beweisen lässt. Was einfach aussieht, muss es noch lange nicht sein!



SEISMOLOGIE

ERDBEBENWARNUNG AM HIMMEL

Kündigen sich Erdbeben hunderte Kilometer über dem Boden durch elektrische Signale in der Atmosphäre an?

SARAH RICE

Erik Vance ist Wissenschaftsautor in Baltimore, Maryland (USA).

spektrum.de/artikel/1640022

RYUSEUNGIL / GETTY IMAGES / ISTOCK



AUF EINEN BLICK
DER TRAUM VON DER FRÜHWARNUNG

1 Experten erforschen seit Langem, ob starke Erdbeben sich auf irgendeine Weise zuvor andeuten. Die bislang untersuchten Naturphänomene ermöglichen aber noch keine sicheren Schlüsse.

2 Neue Beobachtungen deuten darauf hin, dass sich in der äußersten Atmosphärenschicht manchmal 30 Minuten oder mehr vor einem Beben elektrische Ladungen auf charakteristische Weise umverteilen.

3 Wissenschaftler verknüpfen die Ereignisse über ein theoretisches Modell miteinander. Manche Experten zweifeln jedoch an der Vorhersagekraft.

2011 verursachte ein Tsunami nach dem Tōhoku-Erdbeben enorme Verwüstungen in Japan. Rund 20000 Menschen starben.

RYUSEUNGIL / GETTY IMAGES / ISTOCK

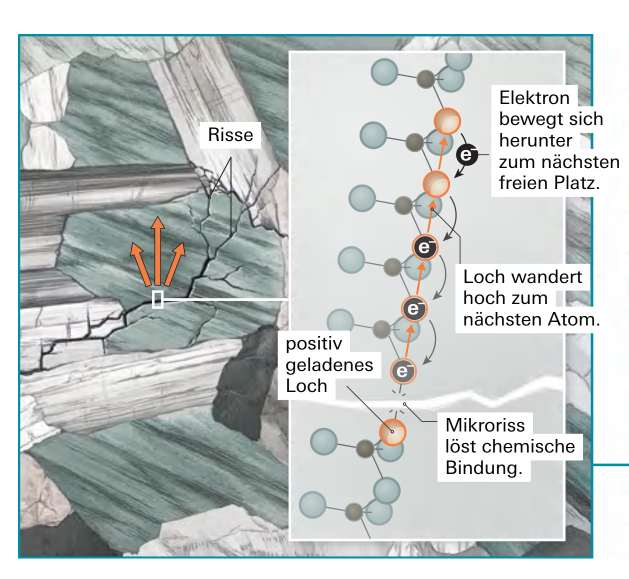
Am Nachmittag des 11. März 2011 begann der Boden im Büro des Geophysikers Kosuke Heki an der Universität Hokkaido im Norden Japans zu schwanken. Die einzelnen Stöße kamen in großen Abständen, jeder dauerte einige Sekunden. Heki ist mit Erdbeben vertraut und untersucht nach einem solchen Ereignis die Verteilung elektrischer Ladungen am Himmel. Was er jetzt spürte, schien ein starkes, aber weit entferntes Erdbeben zu sein. Er hoffte noch, die Daten würden vielleicht seiner Forschung helfen. Dann schaltete jemand die Nachrichten ein – und Hekis Neugierde verwandelte sich in Entsetzen.

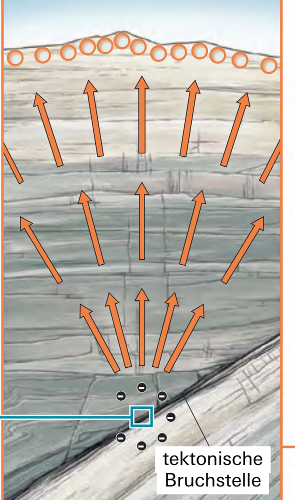
Die Erschütterungen kamen vom größten Erdbeben der modernen japanischen Geschichte, dem verheerenden Tōhoku-Erdbeben der Stärke 9,0. Es kostete schätzungsweise 20000 Menschen das Leben und verursachte Hunderte von Milliarden Euro teure Verwüstungen. Infolge des Bebens hat ein Tsunami das Kernkraftwerk Fukushima Daiichi getroffen und die schlimmste Atomkatastrophe seit einem Vierteljahrhundert ausgelöst.

Während Notfallteams die betroffenen Gebiete evakuierten und versuchten, Leben zu retten, konnte Heki nur warten, bis Telefone und Internetverbindungen in der Gegend wieder funktionierten. Zwei Tage später war es so weit. Heki lud Satellitendaten zur Atmosphäre über der Region Tōhoku herunter und durchkämmte sie. Wie er erwartet hatte, zeigten die Elektronen in der Ionosphäre, der von geladenen Teilchen durchsetzten äußersten Atmosphärenschicht, eine anomale Verteilung zehn Minuten nach dem Ereignis. Doch er konnte seine bisherigen Ergebnisse nicht mit den neuen Daten in Einklang bringen, indem er sich nur den Zeitraum

Die vier Schritte des Modells

Neuen Messungen zufolge könnten mehr als eine halbe Stunde vor einem Erdbeben elektrische Störungen hoch in der Atmosphäre auftreten. Wissenschaftler haben ein Modell entwickelt, das die beiden weit voneinander entfernten Phänomene miteinander verbindet.





MATTHEW TWOMBLY / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2018

1. Beginnender Bruch
Im Boden bewegen sich Teile der Erdkruste langsam gegeneinander. Manchmal bricht das Gestein ruckartig auseinander, woraufhin sich kleinste Risse ausbreiten.

2. Springende Elektronen
Die starken Kräfte entlang dieser Mikrofrakturen lösen chemische Bindungen zwischen Sauerstoffatomen im Fels. Das erzeugt positiv geladene Bereiche (»Löcher«). Benachbarte Elektronen bewegen sich in deren Richtung und hinterlassen wiederum neue Löcher. Insgesamt wandert so ein geringer elektrischer Strom durch das Gestein.

3. Aufsteigende Löcher
Der Vorgang setzt sich wie bei einer Kettenreaktion fort und breitet sich durch die Gesteinsschichten aus – von der ursprünglichen Bruchstelle bis an die Erdoberfläche.

4. Elektrischer Aufstieg
Sammeln sich Löcher auf der Erde, entreißen sie den Molekülen der Atmosphäre Elektronen und erzeugen so ein elektrisches Feld. Dieses kann sich viele Kilometer in die Höhe erstrecken und auf die Verteilung von Elektronen in der hoch gelegenen Ionosphäre auswirken. Das wiederum beeinflusst Signale von Satelliten.

unmittelbar nach dem Beben ansah. Also erweiterte er den Rahmen und schloss auch die Messungen eine Stunde zuvor ein. Was der Forscher dann sah, verschlug ihm den Atem: ein subtiler Anstieg der Elektronendichte über dem Epizentrum des Bebens – 40 Minuten vor dem Ereignis.

Waren das statistische Ausreißer in den Daten? Falsche Werte der Instrumente? Oder steckte mehr dahinter? Wissenschaftler suchen schon lange nach zuverlässigen Vorboten von Erdbeben, nach verräterischen Zeichen, die es erlauben, Menschen rechtzeitig zu alarmieren. Sollte das Verhalten der Elektronen in der Ionosphäre so ein Indikator sein, könnte das viele Leben retten.

Eine begründete Hoffnung – oder nur die neueste in einer langen Reihe von Enttäuschungen?

Hekis Kollegen beschreiben den Wissenschaftler als bescheiden, ruhig und vorsichtig. Entsprechend skeptisch war er gegenüber seinen eigenen Daten. Er durchforstete die Aufzeichnungen zweier weiterer Erdbeben und fand auch dort Anzeichen für vorausgehende Veränderungen in der Elektronendichte. Seither hat er das Signal vor mehr als einem Dutzend großer Beben gefunden und hält es für einen realen, ernst zu nehmenden Effekt.

Inzwischen setzen sich weitere Experten mit der Idee auseinander. »Vor vielen Jahren erschien auch eine Wettervorhersage, wie wir sie heute haben, unmöglich«, kommentiert Yuhe Song, ein Experte für Fernerkundung im Jet Propulsion Laboratory der US-Raumfahrtbehörde NASA. »Vermutlich kündigt sich das, was wir am Boden spüren, ebenso auf andere Weise an. Die Diskussion darüber, was das sein könnte, halte ich für gerechtfertigt.« Das sehen nicht alle so. Vielmehr ist Hekis Arbeit für viele Wissenschaftler lediglich das neueste in einer langen Reihe irreführender Vorhersageversprechen. »Die sind wie Erkältungen, sie grassieren immer wieder«, meint der Seismologe Robert J. Geller, emeritierter Professor der Universität Tokio. Er hat über viele Jahre verschiedene Prognoseansätze untersucht und als nutzlos entlarvt. »Wenn man sie ignoriert, verschwinden sie irgendwann von selbst.«

Hekis Hypothese hält sich jedoch überraschend hartnäckig. Das Elektronensignal hat sich sowohl bei mittleren als auch bei den schwersten Beben gezeigt. Andere Wissenschaftler haben eine theoretische Verbindung zwischen Rissen am Boden und der elektrischen Aktivität am Himmel hergestellt. Heki hat seine Ergebnisse in renommierten Zeitschriften wie »Geophysical Research Letters« veröffentlicht und die Erkenntnisse auf dem jährlichen Treffen der American Geophysical Union vorgestellt. Wenn er Recht behält, können die Auswirkungen enorm sein.

Charles Richter, der US-Seismologe und Erfinder der nach ihm benannten Skala, soll geäußert haben, nur Narren und Scharlatane sagten Erdbeben voraus. Die Menschen versuchen es dennoch seit Langem, etwa durch Beobachtung von Lebewesen: 373 v. Chr. sollen Tiere in Griechenland fünf Tage vor einem zerstörerischen Beben mit einer geschätzten Stärke zwischen 6,0 und 6,7 Schutz gesucht haben. Die Japaner glaubten einmal daran, Welse würden mit ihren Bewegungen die bevorstehende Katastrophe verraten. Die Geschichte kennt viele solcher Orakel, von Hunden und Schafen über Tausendfüßler und Kuhmilch bis zu einer Fasanenart. Auch Umweltphänomene wie plötzlich trockenfallende Brunnen, Temperaturschwankungen sowie die Emission von Radongas und insbesondere die Muster kleinerer Vorbeben spielen eine Rolle.

Mit Hilfe einer Kombination mehrerer Zeichen gelang es in China 1975 sogar, ein Erdbebenrisiko rechtzeitig richtig einzuschätzen und die betroffene Stadt Haicheng zu evakuieren. Das weckte Hoffnungen. »Von den 1970er Jahren an waren Seismologen in den USA und Japan optimistisch, was die kurzfristige Vorhersage von Erdbeben betrifft«, meint Masao Nakatani von der Universität Tokio. Doch obwohl zu jener Zeit vermehrt Forschungsgruppen eingerichtet wurden, blieben zuverlässige Signale schwer fassbar.

Nur ein Jahr nach dem Erfolg in China erwiesen sich die gleichen Techniken als nutzlos dabei, ein weiteres, größeres Beben in einer benachbarten Region vorzeitig zu erkennen. Dabei starben Hunderttausende von Menschen. Japan, das direkt am tektonisch unruhigen pazifischen Feuerring liegt, unternahm riesige Anstrengungen – und stellte doch bloß fest, wie unzuverlässig vermeintliche Warnzeichen sind. Die Natur schien die Regeln immer wieder zu ändern. Die USA gaben in den späten 1990er Jahren ihre Bemühungen auf, nachdem in Kalifornien ein auf Grundlage des Musters früherer Erdbeben vorhergesagtes Ereignis ausblieb. Es traf die Region um die (aus geologischer Sicht besonders gefährdete und darum intensiv beobachtete) Siedlung Parkfield schließlich 2004, aber ohne irgendeines der erwarteten Warnzeichen. Auch eine von der italienischen Regierung eingesetzte Kommission hatte das Kapitel im Wesentlichen abgeschlossen. »Kontinuierlichen Forschungsanstrengungen in Japan zum Trotz gibt es keine nachweislich geeigneten Kriterien, um ein bevorstehendes großes Erdbeben vorauszusagen«, schrieben die Mitglieder noch im Jahr des Tōhoku-Bebens.

Ladungen werden weitergereicht wie Wasser in einer Eimerkette

Wenig später fand Heki 300 Kilometer über der Erdoberfläche die geladenen Teilchen. Eine derartige Verbindung zwischen dem Boden und dem Himmel ist nicht ganz aus der Luft gegriffen. In den 1970er Jahren maßen Wissenschaftler erstmals elektrische Ströme bei Gestein, das starkem Druck ausgesetzt war. Eine mögliche Erklärung: Unter solchen Bedingungen können Sauerstoffatome in bestimmten Verbindungen Elektronen abgeben und positiv geladene »Löcher« hinterlassen. Elektronen aus anderen Atomen in der Nähe rücken nach, was zu einer Kaskade beweglicher Ladungen führt – einem kurzzeitigen elektrischen Strom (siehe »Die vier Schritte des Modells«, links).

Laut dem Entdecker des Phänomens, NASA-Forscher Friedemann Freund, könnten sich die Elektronenlöcher über weite Strecken bewegen: »Es ist wie bei Wasser in einer Eimerkette, das einfach von Person zu Person weitergegeben wird.« Er hält es für möglich, dass die Löcher schließlich die Erdoberfläche erreichen und dort die negativ geladenen Elektronen von Molekülen in der Luft anziehen. Die elektrischen Ladungen wandern dann weiter durch die Atmosphäre. Der hypothetische Mechanismus ist schwierig direkt zu beobachten, würde aber zu bekannten elektrischen Anoma-



Noch Monate nach dem Tsunami von 2011 zeugten Ruinen in den Städten an Japans Ostküste von den gewaltigen Energiemengen, die das Erdbeben freigesetzt hatte.

ARTWAYPICS / GETTY IMAGES / ISTOCK

lien nach einem Erdbeben passen. Doch vor einem Beben hatte noch niemand so einen Effekt feststellen können.

Hekis Messmethode basiert auf dem Netzwerk der GPS-Satelliten. Die Elektronendichte in der Atmosphäre wirkt sich auf subtile Weise darauf aus, wie sich die Funksignale hindurchbewegen. Japan verfügt über ein besonders dichtes GPS-Empfängernetz. Mit diesem konnte Heki Veränderungen der Elektronenverteilung am Himmel hoch über dem Bereich erkennen, der 40 Minuten später zum Epizentrum werden sollte.

Der Geophysiker zögerte, seine Ergebnisse zu publizieren. »Mich trieb die Frage um, wie ich damit an die Öffentlichkeit gehen sollte«, berichtet er. »Beim Thema Erdbebenvorhersage reagieren die Menschen schnell emotional.« Darum blickte Heki nach dem Tōhoku-Beben zunächst auf zwei weitere starke Erdbeben zurück, zu denen detaillierte GPS-Daten verfügbar waren. Auch hier fand er einen verräterischen Anstieg der Elektronenkonzentration mehr als 30 Minuten vorher. Der Zeitverlauf der Signale deutet anscheinend sogar auf die zu erwartende Stärke hin. 2014 hatte ein Beben der Stärke 8,2 in Chile eine Vorlaufzeit von 25 Minuten, weniger als beim stärkeren Beben in Japan. Heki meint: »Ich habe noch nie ein so ausgeprägtes Phänomen kurz vor Erdbeben gesehen.«

Auf Grundlage seiner Beobachtungen veröffentlichte Heki im September 2011 schließlich eine Arbeit mit den Ergebnissen. Andere Wissenschaftler wiesen schnell auf Probleme hin. Einige hielten das Ergebnis für eine Fehlinterpretation der Daten und meinten, Störungen während und nach dem Beben hätten das Bild verfälscht. Heki versuchte daraufhin, mit einer weiteren Analysemethode die Effekte besser herauszuarbeiten, und änderte die Art der Darstellung, damit sie leichter zu erkennen sind. Aber die Kritiker argumentierten, Heki hätte bloß den gleichen fehlerbehafteten Datensatz umgeordnet. Ein japanisches Forscherteam brachte geomagnetische Stürme als alternative Erklärung ins Spiel. Heki führte noch eine Analyse durch und stellte fest, dass das nicht alle Veränderungen erklären konnte.

Bald begannen einige Zweifler, ihm zuzustimmen. »Das ist bei Weitem das beste je entdeckte Vorläuferphänomen«, kommentiert Nakatani, der laut eigenem Bekunden nach den Misserfolgen der 1990er Jahre aufgehört hatte, an Erdbebenprognosen zu glauben. Inzwischen hält Nakatani Hekis Arbeit für »die möglicherweise wichtigste Entdeckung der Erdbebenforschung«. NASA-Forscher Song ist weniger euphorisch, räumt aber ein, die Elektronenwolken seien nach bisherigem Stand wohl eher ein realer Effekt denn ein Fehler. Freund weist unterstützend darauf hin, dass dem Tōhoku-Beben sicherlich ein monatelanger Druckaufbau im Gestein mitsamt Veränderungen bei der Elektronendichte vorausging. Obwohl sich die Spannung ebenso auf andere, unerkannte Weise abgebaut haben könnte, sei die Freisetzung geladener Teilchen sowohl theoretisch zu erwarten als auch vielleicht in Zukunft vor anderen Beben aufspürbar.

Kritiker meinen jedoch, Heki würde mit seinem Computer einem Geist nachjagen, den es in der realen Welt nicht gibt. »Er versucht, seinen ursprünglichen Gedanken zu bestätigen, ohne ihn ausreichend zu unterfüttern«, meint Fabrizio Masci vom National Institute of Geophysics and Volcanology in Italien. Bei seinen Untersuchungen versucht er diese und andere Ideen zur Erdbebenvorhersage zu widerlegen. Er hält die Einlassungen seines japanischen Kollegen für einen »geschickten Weg, die Leser abzulenken«.

Viele der Einwände konzentrieren sich auf die Art, wie Heki mit dem umgeht, was man als das Grundrauschen der Elektronenkonzentration bezeichnen könnte: Die Teilchen gibt es überall auf und um unseren Planeten, und ihre Konzentration schwankt so stark wie das Wetter. Heki glaubt, kurz vor einem Erdbeben würden die Elektronen überdurchschnittlich stark zusammenklumpen. Seine Gegner halten

die Veränderungen aber für ganz normale Variationen im Tagesverlauf der Elektronendichte. Masci geht noch weiter und sagt, falls die Erdbeben selbst grundsätzlich chaotisch sind, seien verlässliche Vorläufer möglicherweise niemals zu finden. Wenn sich die Ausgangsbedingungen eines Ereignisses nicht präzise bestimmen lassen, gilt das erst recht für seine Auswirkungen. Und bei Beben ist es teuflisch schwer, alle Parameter im Blick zu behalten.

Giovanni Occhipinti vom Institut für Geophysik in Paris ist nicht so pessimistisch. Doch auch er stimmt zu, es sei ein großes Problem für eine Vorhersage, alle Faktoren wie den Gesteinstyp, die herrschenden Drücke oder die tektonischen Bruchstellen gut genug zu verstehen. Occhipinti untersucht wie Heki den Zusammenhang von Erdbeben und geladenen Teilchen in der Atmosphäre. Er meint, aus dem ganzen Durcheinander in der Atmosphäre ließe sich kein klares Signal ziehen. Es sei wie der Versuch, einen Hurrikan auf Basis einer einzigen Wolke vorherzusagen. »Es ziehen Unmengen von Wolken vorbei«, führt er aus. »Darunter ausgerechnet diejenige zu finden, die man als Vorläufer sehen möchte, ist alles andere als einfach.«

Selbst, wenn sich die Daten eignen sollten: Der Weg zum funktionierenden Warnsystem ist lang

Bis vor Kurzem stand Occhipinti auf der Seite der Skeptiker und hielt Hekis Entdeckung für einen statistischen Ausreißer. Eine Veröffentlichung vom April 2018 erregte jedoch sein Interesse; in dieser berücksichtigte Heki bei einem Beben den dreidimensionalen Raum. Statt eines einfachen Schnappschusses aus Satellitenperspektive zeigte die 3-D-Modellierung Effekte, die auf einen konsistenten physikalischen Prozess hindeuten. Das macht es schwieriger, die Anomalien als Trugbild abzuschreiben. Occhipinti möchte mehr solcher 3-D-Analysen und Vergleiche mit anderen Modellen sehen, bevor er seine Meinung grundsätzlich ändert. Dennoch nennt er die Idee nun »faszinierend« und will sich ihr genauer widmen. Er mahnt zugleich: »Man muss hier wirklich, wirklich, wirklich gründlich sein, denn man spielt mit dem Leben von Menschen.«

Die Anzahl dieser Leben kann bis in die Hunderttausende reichen. Der United States Geological Survey untersuchte die Todesopfer bei Erdbeben auf der ganzen Welt im Zeitraum zwischen 2000 und 2016. In sieben dieser Jahre gab es mehr als 20000 Todesfälle, und in weiteren zwei Jahren lag die Gesamtzahl bei über 200000. In den am stärksten betroffenen Ländern wünschen sich die Menschen händeringend irgendeine Art von Vorwarnzeit, und seien es nur ein paar Sekunden. Mexiko-Stadt beispielsweise liegt in einem der tödlichsten und zugleich am besten untersuchten Erdbebengebiete der Welt. 1985 starben nach einem katastrophalen Ereignis knapp 10000 Menschen. Daraufhin nutzte die Regierung die Tatsache, dass Erdbebenwellen in der Region über ungewöhnlich lange Strecken reisen, und konstruierte ein Überwachungssystem. Im besten Fall verschafft es immerhin wenige Minuten Zeit.

Carlos Valdés, Direktor des mexikanischen nationalen Zentrums zur Katastrophenabwehr, mahnt indes: Eine Vorwarnzeit von 40 Minuten klinge auf dem Papier vielleicht gut, aber in der Realität kämen diverse Probleme hinzu. Fehlalarme könnten etwa Evakuierungen und weitere vorbeugende Notfallmaßnahmen durchkreuzen. Einige derart angekündigte Beben in Mexiko stellten sich letztlich als nicht bedrohlich heraus. Die Menschen ärgerten sich darüber und reagierten irgendwann gar nicht mehr. Valdés sorgt sich auch um den umgekehrten Effekt: Panik. »Es braucht nur eine schreiende Person, und alle folgen.« Straßen verstopfen, und am Ende kommt niemand in Sicherheit.

Doch bereits kurze Warnzeiten ermöglichen es den Behörden zumindest, das Gas abzudrehen oder U-Bahnen anzuhalten und damit Risiken zu mindern. Eine höhere Genauigkeit würde das Problem der Fehlalarme reduzieren. Britische und russische Wissenschaftler planen seit einigen Jahren ein Satellitenprojekt, um atmosphärische Anomalien besser zu verfolgen, und China schreitet mit einem Programm zur weltraumgestützten Vorhersage von Naturereignissen voran, das auf elektromagnetischen Störungen in der Ionosphäre basiert. Selbst wenn sich Hekis Erkenntnisse bestätigen – angesichts der komplexen Natur der Ionosphäre und der chaotischen Charakterzüge von Erdbeben könnte es Jahrzehnte dauern, bis aus atmosphärischen Daten funktionierende Warnungen werden.

Geller glaubt nicht daran: »Die Hoffnung auf Warnzeichen gründete im Lauf der letzten mehr als 100 Jahre auf der naiven Annahme, es müsse erstens überhaupt Vorzeichen geben und zweitens, sie würden umso deutlicher sein, je stärker das Beben wird. Aber es gibt keinen besonderen Grund, warum diese Überzeugungen korrekt sein sollten.« Heki versucht unterdessen weiter, einige Datenlücken zu schließen und besser zu verstehen, welche Vorgänge in der Erdkruste die atmosphärischen Effekte erzeugen. »Vor einem Erdbeben passiert etwas in der Ionosphäre. Ich kenne den physikalischen Mechanismus noch nicht«, meint er, »doch die Beobachtung an sich ist klar genug.« ◂

QUELLEN

He, L., Heki, K.: Ionospheric anomalies immediately before M_w7.0–8.0 earthquakes. Journal of Geophysical Research: Space Physics 122, 2017

He, L., Heki, K.: Three-dimensional tomography of ionospheric anomalies immediately before the 2015 Illapel earthquake, central Chile. Journal of Geophysical Research: Space Physics 123, 2018

Kelley, M.C. et al.: Apparent ionospheric total electron content variations prior to major earthquakes due to electric fields created by tectonic stresses. Journal of Geophysical Research: Space Physics 22, 2017

SCHLICHTING!
EXPLOSIONSSPUREN IM GARTENTEICH



Luftblasen, die auf der Wasseroberfläche schwimmen, platzen irgendwann – und lösen gleich mehrere physikalische Prozesse aus. Dabei ist die treibende Kraft die Oberflächenspannung des Wassers.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1640024

Was ist aber aus der Blase indessen geworden?
Sie ist ja zerplatzt ins Nichts,
wo ist nun noch eine Spur der Majestät,
mit der sie umkleidet war?
Bettina von Arnim (1785–1859)

Wenn ein Springbrunnen in einem Teich plätschert, entstehen auf der Wasseroberfläche größere und kleinere Luftblasen, die davontreiben und in ruhigerer Umgebung ein manchmal überraschend langes Dasein fristen. Eigentlich ist es bereits erstaunlich, dass sie sich überhaupt bilden – hat man es denn nicht bloß mit Wasser in seinen unterschiedlichen Formen und Bewegungszuständen zu tun? Aber wenn ein Tropfen des Brunnens aus einiger Höhe ins Wasser fällt, drückt er es beim Eintauchen zu den Seiten weg und reißt regelrecht ein Loch hinein. Die Oberfläche schließt sich mit einer kurzen Verzögerung wieder über dem sinkenden Tropfen, und ein Hohlraum bleibt zurück (siehe »Der Klang des tropfenden Wassers«, **Spektrum** Februar 2019, S. 60). Die eingefangene Luft bewegt sich wegen ihrer geringen Dichte sofort aufwärts und drückt eine dünne Wasserhaut mit nach oben. Oft platzt die Blase gleich, doch gelegentlich lässt sie sich damit noch einige Zeit (siehe oberes Foto auf dieser Seite).

Die Lebenszeit hängt auch von der genauen Zusammensetzung der Flüssigkeit ab. Eine Haut aus reinem Wasser reißt wegen der großen Oberflächenspannung ziemlich schnell. Die im Teich stets vorhandenen Verunreinigungen, beispielsweise pflanzliche Proteine, verschaffen ihr eine gewisse Entspannung. Dann überdauert die Blasenwand länger und platzt erst, wenn sie durch Herabfließen von Wasser auf Grund der Schwerkraft eine



H. JOACHIM SCHLICHTING

Unmittelbar nachdem eine Blase (oben) explodiert ist, laufen Wellen über die Wasseroberfläche (unten). Im Zentrum bleibt nur ein Kranz kleinster Bläschen zurück (Pfeil).



H. JOACHIM SCHLICHTING



Eine Blase ist gerade explodiert, und ein Wellensystem entsteht. Eine neue Aufwölbung im Zentrum ist durch eine halbmondförmige Reflexion des Himmels zu erkennen. Die davonlaufenden Wellen verzerren das direkte Bild des Teichbodens (rechts oben gut zu erkennen). Außerdem zeigen sie sich auf diesem – indem sie das Sonnenlicht brechen – als System aus hellen und dunklen Ringen (untere Bildhälfte).

H. JOACHIM SCHLICHTING

kritische Dicke unterschreitet. Dabei kommt es zu einer Art Miniexplosion, denn die Blase steht im Vergleich zur äußeren Atmosphäre unter einem kleinen Überdruck. Deswegen beult sie die Wasseroberfläche zuvor auch etwas nach unten hin ein. Im Moment des Druckausgleichs bewegt sich die Delle wieder nach oben, schießt wegen ihrer Trägheit ein wenig über das Ziel hinaus, schnellt durch die Rückstellkraft der gespannten Oberfläche wieder zurück und so weiter.

Kleine Wellen wallen anders als große

Das löst Bewegung im Wasser aus – Ringe breiten sich über den Teich Richtung Rand aus. Schaut man sie sich genauer an, eilen diejenigen mit den kürzeren Wellenlängen denen mit den längeren voraus. Diese besondere Reihenfolge lässt sich nur bei Wasserwellen beobachten, die höchstens wenige Zentimeter lang sind. Auf so kleinen Skalen dominiert nämlich die Oberflächenspannung als treibende Kraft der Schwingung, und es entstehen so genannte Kapillarwellen. Sie laufen umso schneller, je kleiner die Wellenlänge ist. Wirft man hingegen einen Stein ins Wasser, so überwiegt der Einfluss der Schwerkraft. Sie bestimmt auch das Auf und Ab in den Ozeanen. Im Fall solcher »Schwerewellen« sind die längeren Wellen schneller, und entsprechende Ringsysteme erscheinen gerade umgekehrt sortiert.

Beim Platzen der Blase zerreißt die nasse Haut in kleinere Fragmente. Diese schnurren blitzschnell zu winzigen Tröpfchen zusammen, um die Grenzfläche mit der Luft zu minimieren und so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Ein paar der so entstandenen Tröpfchen vereinigen sich nicht sofort mit dem übrigen Wasser, sondern flitzen vorher noch ein Stück weit über seine Oberfläche (siehe »Surfende Wassertropfen«, **Spektrum** Februar 2018, S. 60).

Das Foto links unten zeigt das Geschehen kurz nach einer solchen Explosion. Die letzten Schwingungen mit der größten Wellenlänge entfernen sich gerade vom Ort des Geschehens und hinterlassen eine glatte Oberfläche. Dennoch erinnert etwas an das Vorangegangene: ein Kranz winziger Bläschen im Zentrum. Die größeren Blasen sind meist von mehreren viel kleineren umgeben. Erstere haben letztere sozusagen eingesammelt – ebenfalls eine Konsequenz des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Indem große und kleine Blasen eine gemeinsame Oberfläche nutzen, verringern sie insgesamt ihre Energie. Da die kleinen langlebiger sind, bleiben sie noch eine Weile nach der Explosion erhalten. Rechts im Bild ist der Rest eines schon vorher explodierten Objekts zu erkennen. Die dadurch verursachte wellenförmige Störung ist aber längst verschwunden.

Das an sich transparente Medium Wasser macht die Vorgänge überhaupt erst sichtbar, indem es die Umgebung verzerrt widerspiegelt oder – bei flachen, klaren Gewässern – das Bild des Untergrunds bricht und krümmt. Ein dritter möglicher Effekt kommt hinzu, wenn die Wellen das Sonnenlicht als helle und dunkle Ringe auf den Teichboden bündeln beziehungsweise defokussieren. Manchmal treten alle drei Phänomene zusammen auf und konkurrieren regelrecht um die Aufmerksamkeit des Beobachters (siehe Foto auf dieser Seite). Dann demonstrieren die Blasen und die Wellen eindrucksvoll, wie in einem scheinbar einfachen Vorgang zahlreiche mechanische und optische Effekte gemeinsam wirken können.

DER WEG ZUR MONDSTATION

Am 21. Juli 1969 setzte ein Mensch erstmals seinen Fuß auf den Mond. Dreieinhalb Jahre lang landeten dort immer wieder Astronauten. Danach klang das Interesse ab – bis jetzt.

Wissenschaftler und Raumfahrtmanager wollen eine Siedlung auf dem Erdtrabanten errichten. Doch dafür müssen sie noch eine Reihe von Problemen lösen.



Elizabeth Gibney ist Physikjournalistin des Wissenschaftsmagazins »Nature« in London.

spektrum.de/artikel/1640026

Wenn Matthias Maurer auf der Oberfläche des Mondes spazieren gehen will, muss er künftig bloß nach Köln fahren. Hier bauen das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die Europäische Weltraumorganisation ESA derzeit den größten Mondsimulator der Welt: Eine 1000 Quadratmeter große Grube, die mit künstlichem Mondstaub gefüllt wird.

Dank eines ausgeklügelten Systems von Flaschenzügen werden Maurer und andere Wissenschaftler in der Halle ähnlich unbeschwert herumspringen können wie auf dem Erdtrabanten. Mit justierbaren Lampen sollen sich außerdem die besonderen Lichtverhältnisse nachstellen lassen. Ab und an können die Astronauten sogar in eine Art Unterkunft einkehren – ein mit einer Luftschleuse versehenes Modul von der Größe eines Frachtcontainers.

Das Projekt biete eine »aufregende Spielwiese« um jene Technologien zu testen, die für eine echte Mondbasis nötig wären, sagt Maurer. Seit 2015 ist er neben Alexander Gerst der zweite Deutsche im Astronautenkorps der ESA. Daneben fungiert Maurer als Projektmanager der mehrere Millionen Euro teuren Anlage namens LUNA, die in der Nachbarschaft des europäischen Astronautenzentrums EAC entsteht.

Der 49-Jährige weiß nicht, ob er seine in LUNA erworbenen Fähigkeiten jemals auf der echten Mondoberfläche anwenden kann. »Ich hoffe natürlich, es vor meiner Pensionierung dorthin zu schaffen«, so Maurer. »Technisch halte ich das für möglich.« Der Optimismus ist nicht völlig unbegründet. Zuletzt hat ein Mensch am 14. Dezember 1972 den Mond betreten, es war der US-Astronaut Eugene Cernan im Rahmen der Mission Apollo 17. Maurer war damals gerade mal zwei Jahre alt. Und kürzlich hat US-Vizepräsident Mike Pence angekündigt, dass bereits 2024 Astronauten wieder zum Mond fliegen sollen. Ob es wirklich so schnell geht, ist fraglich: Bislang gibt es keine verbindliche Finanzierung für solch eine Mission. Doch zweifellos erhalten derartige Pläne immer mehr Aufwind.

NASA/JPL/USGS; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Raumfahrtbehörden wollen dabei nicht einfach nur die Apollo-Missionen wiederholen. Sie liebäugeln zunehmend mit einer dauerhaften Siedlung. Bei manchen Wissenschaftlern rennen sie damit offene Türen ein. Diese befürworten die Idee einer Mondstation schon lange, weil sich damit Experimente auf dem Erdtrabanten einfacher durchführen ließen. Daneben böte eine permanente Präsenz die Möglichkeit, Technologien für Marsflüge zu testen.

Unternehmer reizt derweil die Idee, Sauerstoff und Wasserstoff aus lunarem Eis zu gewinnen, als Treibstoff für Raketen. Sollte das gelingen, könnte der Mond zu einer Art interplanetaren Tankstelle werden, mit der sich die Kosten für Raumflüge deutlich senken ließen. »Wasser ist das Erdöl des Weltraums«, sagt etwa George Sowers, Luft- und Raumfahrtforscher an der Colorado School of Mines in den USA. Früher war er Chefwissenschaftler der United Launch Alliance, einem Joint Venture der Konzerne Boeing und Lockheed Martin, das für US-amerikanische Regierungsbehörden Starts mit verschiedenen Trägerraketen organisiert. Heute gehört er zu jenen, die für eine bemannte Rückkehr zum Mond werben: »Wir finden immer mehr Beweise dafür, dass es ökonomisch lohnende Lagerstätten von Wassereis auf dem Mond gibt.«

Der ESA-Chef träumt von einem Monddorf

Die staatlichen Raumfahrtagenturen sind bisher allerdings sehr zurückhaltend, wenn es um einen Zeitplan für den Aufbau einer bemannten Mondstation geht. So liegt das Ziel außerhalb ihrer individuellen Budgets. Machbar dürfte es nur sein, wenn Firmen und Privatinitiativen einen Teil des Geldes aufbringen.

Jan-Dietrich Wörner, Generaldirektor der ESA, sieht gerade darin jedoch eine Chance. Er betont seit Jahren die Vorteile einer Zusammenarbeit von Nationen und Unternehmen in Sachen Mond. So könnte sich eine zumindest zeitweise bemannte Siedlung aufbauen lassen, Wörner spricht von einem Monddorf. Auch die Raumfahrtbehörde der Volksrepublik China soll entsprechende Pläne haben, wie man immer wieder in den staatlichen Medien des Landes lesen kann, wenngleich auch hier jede Zeitangabe fehlt.

Seit einiger Zeit sind Europa und China nicht mehr die einzigen Staaten, die derartige Ambitionen verfolgen. Im Dezember 2017 ebnete eine Anweisung des US-Präsidenten in den USA den Weg in Richtung Erdtrabanten. Die NASA solle ihren Schwerpunkt von der Erforschung von Asteroiden wieder zu bemannten Flügen zum Mond verlagern, forderte Donald Trump in einer Präsidialdirektive. Seither hat die NASA Unternehmen aufgefordert, die Technik für Landefähren zu entwickeln. Auch will sie in den nächsten fünf Jahren Milliarden von Dollar für die Erforschung des Mondes ausgeben, mit dem klaren Ziel einer bemannten Mission.

Derweil steuert ebenfalls die Privatwirtschaft in diese Richtung: Im Oktober 2018 startete das europäische Unternehmen Airbus den Wettbewerb »Moon Race« (Wettlauf zum Mond), zu den Förderern zählt unter anderem die ESA und das US-Raumfahrtunternehmen Blue Origin. Ziel ist die Entwicklung von Schlüsseltechnologien für eine nachhaltige Präsenz auf dem Mond.

In den kommenden Jahren werden jedoch erst einmal ferngesteuerte Sonden den Mond erkunden. So startete China im Dezember 2018 Chang'e 4, die mittlerweile erfolgreich auf der Mondrückseite gelandet ist und dort einen Rover ausgesetzt hat. Indien versucht sich dieses Jahr ebenfalls an einer eigenständigen Mission mit dem Namen Chandrayaan-2. Und auch Russland plant eine Mondsonde, die innerhalb der nächsten fünf Jahre starten soll.

Zusätzlich dazu wollen NASA, ESA und die Raumfahrtbehörden von Russland, Japan und Kanada bis Mitte der 2020er Jahre eine Raumstation in einer Mondumlaufbahn bauen. Die USA wollen hierfür in den kommenden fünf Jahren mehrere Milliarden Dollar zur Verfügung stellen. Eine lunare Raumstation gilt als wichtiger Zwischenschritt für eine bemannte Rückkehr, sie könnte Astronauten als Ausgangsbasis für Ausflüge auf die Mondoberfläche dienen. Diese würden dann mit einem Fahrzeug, das mit einer Druckkabine ausgestattet ist, mehrere Wochen den Mond erkunden. Maurer spricht von einer »Wohnmobil-Lösung«.

Der nächste Schritt wäre dann der Bau einer Siedlung auf der Mondoberfläche. »Ich denke, 20 Jahre sind ein realistischer Zeitrahmen für den Aufbau einer gewissen Infrastruktur auf dem Mond, die von Menschen bewohnt oder zumindest gewartet wird«, sagt James Carpenter, der bei der ESA für die Planung der bemannten und robotischen Forschungsmissionen zuständig ist.

Wissenschaftler untersuchen bereits seit Langem die Möglichkeiten, Ressourcen auf dem Mond zu fördern. Bisher war jedoch unklar, ob diesen Träumen je Taten folgen würden. Durch die neuesten Entwicklungen sind die Chancen dafür zweifellos gestiegen. Das gilt zum einen für

NASA/JPL/USGS; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

AUF EINEN BLICK
RÜCKKEHR ZUM MOND

1 50 Jahre nach der ersten Mondlandung bereiten sich Raumfahrtagenturen und Unternehmen auf neue Flüge zum Erdtrabanten vor.

2 Einer der Pläne sieht sogar eine bemannte Station auf der Mondoberfläche vor. Damit Menschen dort längere Zeit bleiben können, sind jedoch neue Technologien nötig.

3 Mit ihnen könnten Astronauten zum Beispiel Wasser und Raketentreibstoff aus Mondgestein gewinnen. Der Aufwand hierfür könnte allerdings sehr hoch sein.

Leben auf dem Mond

Wie wir auf den Erdtrabanten zurückkehren – und dort dauerhaft bleiben können

Bislang hat niemand Geld zur Verfügung gestellt, um Menschen wieder zum Mond zu bringen. Doch die Idee einer Rückkehr zum Erdtrabanten gewinnt an Schwung. Und Wissenschaftler bereiten bereits Technologien für eine nachhaltige Besiedelung des Mondes vor – mit ihnen ließen sich Pflanzen anbauen, Unterkünfte errichten und Treibstoff herstellen. Hier zeigen wir, wie das Leben auf dem Mond aussehen könnte.

Lunare Orbital-Plattform

Wenn die Internationale Raumstation ISS Mitte der 2020er Jahre ausgedient hat, soll das der nächste internationale Außenposten der Menschheit im All werden: eine Station in der Nähe des Mondes. Als Gemeinschaftsprojekt von NASA, ESA, JAXA und anderen könnte sie als Ausgangsbasis für Flüge zur Mondoberfläche dienen.

Teleskop auf der erdabgewandten Seite

Astronomen träumen von einem Radioteleskop auf der erdabgewandten Seite des Mondes. Dort wären die empfindlichen Empfänger extrem gut gegen Störungen von der Erde abgeschirmt.

Wo sollen wir siedeln?

Am Äquator:

Von einer Station am Äquator kann man am leichtesten starten und landen. Von hier aus könnte man auch problemlos mit der Erde kommunizieren. In den lunaren Nächten wäre aber die Energieversorgung eine Herausforderung.

An den Polen:

Kolonien in den Polarregionen hätten Zugang zu Eisablagerungen, einer interessanten Geologie und sonnenbeschienenen Berggipfeln. In permanent im Schatten liegende Regionen kann man jedoch nur schwer landen. Und der Funkkontakt zur Erde ist nicht von überall dauerhaft möglich.

Energieversorgung

Fotovoltaikanlagen liefern elektrischen Strom. Spiegel, die das Sonnenlicht bündeln, spenden Wärme für Prozesse wie 3-D-Druck. Laser senden die Energie aus sonnenbeschienenen Bereichen in die im Schatten liegenden Regionen. Mit Sonnenenergie betriebene Elektrolyseanlagen spalten Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff für Brennstoffzellen und Raketentreibstoff.

Nahrung

Grünkohl und Kartoffeln lassen sich in geschützten, mit LED-Strahlern beleuchteten Gewächshäusern anbauen. Pflanzen verwerten Abfall und erzeugen Sauerstoff aus Kohlendioxid und bilden so einen wesentlichen Bestandteil des Lebenserhaltungssystems.

Wann?

● geplant ● erwartet ● spekulativ

2018–19 Start indischer und chinesischer Rover zur Vorder- und Rückseite des Mondes

2020 Landung der ersten kommerziellen Mondsonden

2020/21 geplante Teststarts des Space Launch System und der Orion-Kapsel der NASA

2022 Beginn des Baus einer Station in einer Umlaufbahn um den Mond

2023 russische Luna-Mission in die polare Region

2023 erster bemannter Flug der NASA um den Mond seit einem halben Jahrhundert

2024 erste Besatzung an Bord der lunaren Orbitalstation

2025 ESA-Mission zur Demonstration der Produktion von Wasserstoff und Sauerstoff auf dem Mond

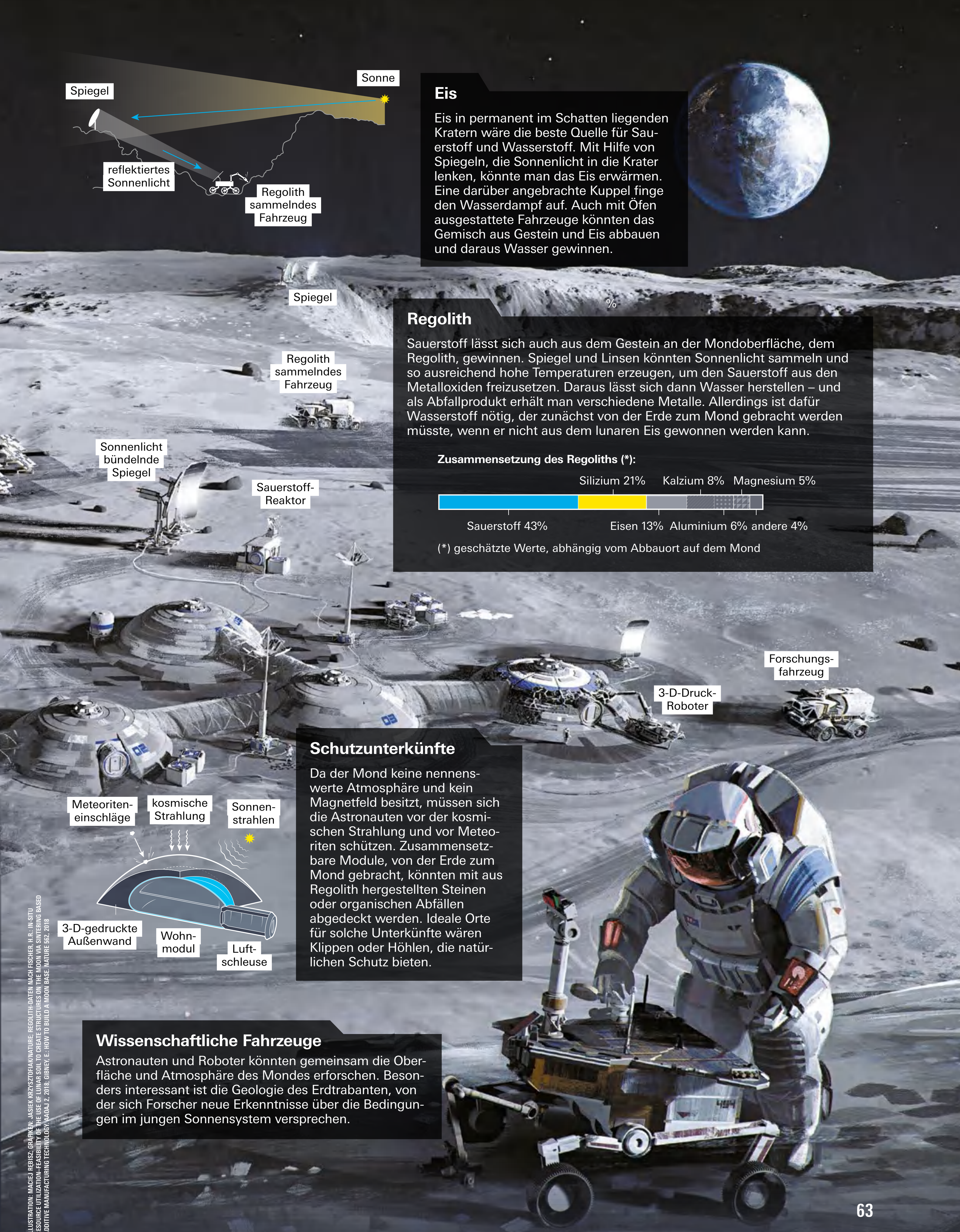
Mitte der 2020er Jahre Robotermissionen bereiten bemannte Missionen auf der Mondoberfläche vor.

Ende der 2020er Jahre Kurze bemannte Missionen auf die Mondoberfläche. Zum Einsatz kommen Fahrzeuge mit Druckkabinen. Großversuche zum Abbau von Bodenschätzen auf dem Mond

In den 2030er Jahren erste Habitate auf dem Mond mit Lebenserhaltungssystem und Nutzung lunarer Ressourcen

Ende der 2030er Jahre über längere Zeiträume bemannte Mondstation

ILLUSTRATION: MACIEJ RĘBISZ; GRAFIKEN: JASIEK KRZYSZTOFIAK/NATURE; GIBNEY, E.: HOW TO BUILD A MOON BASE. NATURE 562, 2018



Eis

Eis in permanent im Schatten liegenden Kratern wäre die beste Quelle für Sauerstoff und Wasserstoff. Mit Hilfe von Spiegeln, die Sonnenlicht in die Krater lenken, könnte man das Eis erwärmen. Eine darüber angebrachte Kuppel finge den Wasserdampf auf. Auch mit Öfen ausgestattete Fahrzeuge könnten das Gemisch aus Gestein und Eis abbauen und daraus Wasser gewinnen.

Regolith

Sauerstoff lässt sich auch aus dem Gestein an der Mondoberfläche, dem Regolith, gewinnen. Spiegel und Linsen könnten Sonnenlicht sammeln und so ausreichend hohe Temperaturen erzeugen, um den Sauerstoff aus den Metalloxiden freizusetzen. Daraus lässt sich dann Wasser herstellen – und als Abfallprodukt erhält man verschiedene Metalle. Allerdings ist dafür Wasserstoff nötig, der zunächst von der Erde zum Mond gebracht werden müsste, wenn er nicht aus dem lunaren Eis gewonnen werden kann.

Zusammensetzung des Regoliths (*):

(*) geschätzte Werte, abhängig vom Abbauort auf dem Mond

Schutzunterkünfte

Da der Mond keine nennenswerte Atmosphäre und kein Magnetfeld besitzt, müssen sich die Astronauten vor der kosmischen Strahlung und vor Meteoriten schützen. Zusammensetzbare Module, von der Erde zum Mond gebracht, könnten mit aus Regolith hergestellten Steinen oder organischen Abfällen abgedeckt werden. Ideale Orte für solche Unterkünfte wären Klippen oder Höhlen, die natürlichen Schutz bieten.

Wissenschaftliche Fahrzeuge

Astronauten und Roboter könnten gemeinsam die Oberfläche und Atmosphäre des Mondes erforschen. Besonders interessant ist die Geologie des Erdtrabanten, von der sich Forscher neue Erkenntnisse über die Bedingungen im jungen Sonnensystem versprechen.

ILLUSTRATION: MACIEJ RĘBISZ; GRAFIKEN: JASIEK KRZYSZTOFIAK/NATURE; REGOLITH-DATEN NACH FISCHER, H.R.: IN-SITU RESOURCE UTILIZATION–FEASIBILITY OF THE USE OF LUNAR SOIL TO CREATE STRUCTURES ON THE MOON VIA SINTERING BASED ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY. AAOAJ 2, 2018; GIBNEY, E.: HOW TO BUILD A MOON BASE. NATURE 562, 2018

Maurer und andere Wissenschaftler am LUNA-Zentrum der ESA. Sie wollen in den nächsten Jahren praxisnah das Leben und den Rohstoffabbau auf dem Mond einüben. Andere Forscher arbeiten derweil an Lösungen für den Anbau von Nahrungspflanzen und die Konstruktion strahlungsresistenter Unterkünfte.

Im Juli 2018 fand am European Space Research and Technology Center der ESA im niederländischen Nordwijk eine Konferenz über zukünftige bemannte Mondmissionen statt. Mehr als 250 Spezialisten aus der akademischen Forschung, Bergbau, Metallurgie, Ingenieurwissenschaften und Architektur tauschten dort ihre Ideen aus. »Hätte man diese Tagung fünf Jahre früher abgehalten, wäre nur eine Hand voll Leute gekommen«, berichtet Aidan Cowley, wissenschaftlicher Berater am EAC. »Die Nachfrage ist gewaltig gestiegen.« Zwar ist keineswegs sicher, ob es jemals eine Mondstation geben wird. Die Vorbereitungen dafür sind aber in vollem Gang.

Wasser wäre auf dem Mond reichlich vorhanden

Die erste große Herausforderung für Siedler auf dem Mond wäre die Versorgung mit Wasser. Dass es dieses dort überhaupt in nennenswerter Menge gibt, ist eine relativ neue Erkenntnis: Die Gesteinsproben der Apollo-Missionen, die vom Mondäquator stammen, deuteten zunächst auf einen extrem trockenen und unwirtlichen Himmelskörper hin. Vor einem Jahrzehnt entdeckte die indische Mission Chandrayaan-1 dann jedoch Hinweise auf Wassereis an den Polen des Mondes. »Das war eine bahnbrechende Wende«, kommentiert Robert Mueller vom Kennedy Space Center der NASA am Cape Canaveral, der Bergbau-Technologien für den Mond entwickelt.

Bislang wissen die Forscher allerdings nicht, wo sich jene großen Eisreservoire, die man seitdem nahe den Polen vermutet, genau befinden. Außerdem ist unklar, ob das gefrorene Wasser mit Gestein gemischt ist oder separate Schichten bildet und wie dick diese sind. Der indische Rover Chandrayaan-2 und der für 2023 geplante russische Lander Luna-27 sollen hier Klarheit schaffen.

Luna-27 ist mit einem von der ESA entworfenen, zwei Meter langen Bohrer ausgestattet sowie mit einem Labor zur Untersuchung des Ursprungs und der Häufigkeit von lunarem Wasser. Auch die NASA möchte sich an der Jagd nach dem kostbaren Nass auf dem Mond beteiligen. Sie hat eine Reihe von Unternehmen damit beauftragt, ab 2019 Mondsonden mit Instrumenten für die Suche nach Bodenschätzen zu entwickeln.

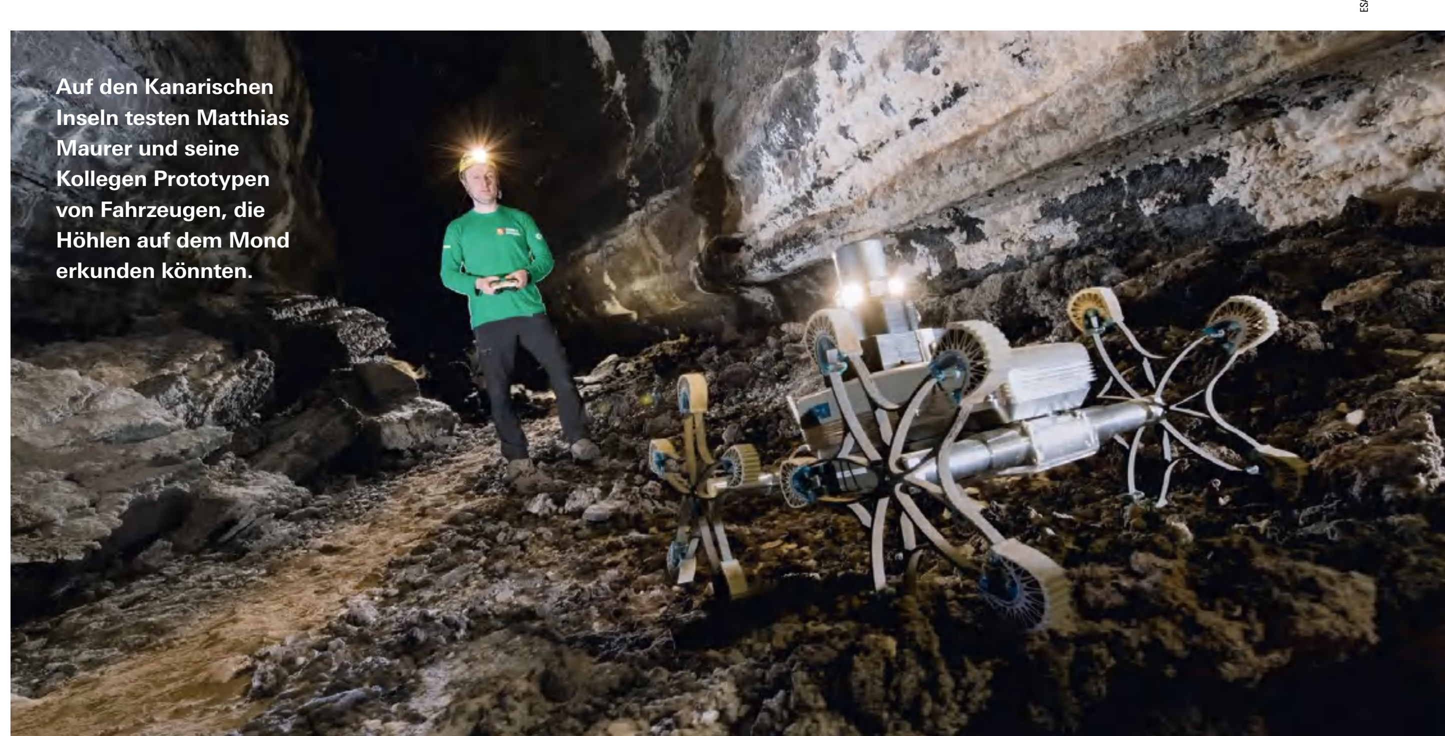
Eine mit vier Personen bemannte Mondstation würde nur einige dutzend Tonnen Wasser pro Jahr benötigen, schätzt US-Raumfahrtforscher Sowers. Das wäre eine kleine Menge im Vergleich zu den vermutlich vorhandenen Ressourcen. »Schätzungen auf Basis der vorliegenden Daten deuten auf zehn Milliarden Tonnen Wasser an jedem der Mondpole hin.«

Der Löwenanteil des auf dem Mond gewonnenen Wassers könnte man daher für die Produktion von Treibstoff verwenden. Laut Sowers sollte sich das für Bergbaufirmen lohnen: Seinen Berechnungen zufolge ließen sich pro Jahr tausend Tonnen Wasser abbauen und per Elektrolyse in Sauerstoff und Wasserstoff aufspalten.

Dank der geringen Schwerkraft des Mondes wäre es sehr viel günstiger, dort Raumfahrzeuge für lange Weltraumflüge zu betanken als auf der Erde. Eine Sonde mit auf dem Mond befülltem Tank, die zur Erde zurückkehrt, würde beispielsweise nur ein 50stel der Kosten verursachen wie eine vergleichbare Sonde, die ihren gesamten Treibstoff von der Erde mitbringt. Das besagen zumindest Überschlagsrechnungen.

Immerhin könnte das Wasser auf dem Mond leichter zugänglich sein als lange vermutet: Im August 2018 fanden Wissenschaftler mit Hilfe der von der indischen Sonde Chandrayaan-1 gelieferten Daten heraus, dass es zum Teil direkt an der Oberfläche liegt, wenn auch nur in permanent im Schatten liegenden Kratern bei Temperaturen von minus 249 Grad Celsius. Man würde also viel Wärme und Energie benötigen, um das Eis abzubauen, zu schmelzen und in Raketentreibstoff umzuwandeln.

Plutonium-Batterien, die auf der beim radioaktiven Zerfall freigesetzten Wärme basieren, dürften für die meisten privaten Unternehmen jedoch zu teuer sein. Deshalb werden



ESA · ROBBIE SHONE

Auf den Kanarischen Inseln testen Matthias Maurer und seine Kollegen Prototypen von Fahrzeugen, die Höhlen auf dem Mond erkunden könnten.

lunare Bergbau-Unternehmen, sofern es sie wirklich eines Tages gibt, vermutlich Sonnenenergie nutzen. Dabei könnten sie sich Anregungen im südlichen Norwegen holen: Auf einem hohen Berg oberhalb der Stadt Rjukan haben die Bewohner einen großen Spiegel installiert, der Sonnenlicht auf den zentralen Platz der Stadt lenkt – dort wäre es sonst im gesamten Winter kalt und dunkel.

Ähnliches wäre auf dem Mond möglich, argumentiert Sowers. Mit Hilfe von Spiegeln könnte Licht von hohen Bergspitzen direkt in die im ewigen Schatten liegenden Krater reflektiert werden. Das Sonnenlicht würde das Eis erwärmen und es verdampfen lassen. Das Kondenswasser könnte man dann zu einer Verarbeitungsanlage transportieren und dort mit Sonnenenergie in Wasserstoff und Sauerstoff aufspalten. Diese Gase könnten Astronauten wiederum speichern und sowohl als Raketentreibstoff als auch für Brennstoffzellen zur Energieversorgung nutzen.

Es gibt noch eine andere Möglichkeit: Fahrzeuge könnten das Gemisch aus Eis und Mondgestein abräumen und in mitgeführten Öfen erwärmen. Auch so ließe sich Wasser gewinnen. Ingenieure haben hierzu bereits detailliertere Ideen entwickelt. Sehr starke Laser, die ihren Strom aus Solarzellen beziehen, könnten beispielsweise die Fahrzeuge drahtlos mit Saft versorgen.

In der Kölner LUNA-Anlage wollen die Wissenschaftler testen, wie dieses Verfahren in der Realität funktioniert. Auf dem Testgelände könnte man zusätzliche Herausforderungen berücksichtigen, wie etwa aufgewirbelten Mondstaub, der den Laserstrahl streut, sagt Leopold Summerer von der ESA. In dem Mondsimulator sollen laut Matthias Maurer Wissenschaftler jedenfalls auch in Krater klettern, um zu sehen, wie schwierig dies an den dunklen, steilen Abhängen ist.

Was der Mondboden alles hergibt

Sollte das Eis auf dem Mond nicht ohne Weiteres zugänglich sein, so bietet sich eine alternative Wasserquelle an: Der als Regolith bezeichnete Boden enthält Silizium- und Metalloxide, die insgesamt 43 Prozent Sauerstoff pro Masseneinheit enthalten, und zwar überall auf dem Mond. Dieser Sauerstoff ließe sich prinzipiell als Energiequelle für wissenschaftlich oder wirtschaftlich interessante Außenposten fernab der Mondpole nutzen. Zudem würde der Regolith nützliche Nebenprodukte wie seltene Metalle abwerfen.

Allerdings gibt der Mondboden seine wertvollen Bestandteile nicht so einfach her. Den Sauerstoff aus seinen chemischen Bindungen zu lösen, erfordert noch weit mehr Energie als die Erwärmung von Eis. Theoretisch könnte man große Spiegel verwenden, um Sonnenlicht in einem Brennofen zu bündeln, der kaum größer als ein Briefumschlag sein müsste. So ließe sich das Mondgestein auf mehr als 900 Grad Celsius erhitzen.

Bei diesen Temperaturen kann Wasserstoff oder Kohlenstoff – der zunächst von der Erde mitgebracht werden müsste – den Sauerstoff von den Mineralien ablösen. Mit Wasserstoff würde dieser dann zu Wasser reagieren. Ein Feldversuch auf Hawaii mit simuliertem Regolith zeigte 2010, dass dieses Verfahren funktioniert. Bei niedriger Schwerkraft und im Vakuum haben es Wissenschaftler bislang freilich noch nicht getestet. »Im Prinzip ist es jedoch ein erprobtes Verfahren, das in wenigen Jahren einsatzfähig wäre«, sagt Mueller.

Die Forscher hoffen, die Prozesse weiter zu verbessern. Sie wollen damit auch die Menge an Material reduzieren, die Astronauten von der Erde zum Mond bringen müssten. Am Polytechnikum Mailand entwickelt eine von der Luftfahrt-Ingenieurin Michéle Lavagna geleitete Gruppe beispielsweise einen Prototypen, der bei niedrigerer Temperatur arbeitet und alle zugeführten Stoffe – in diesem Fall Methan und Wasserstoff – wiederverwendet. Ein einzelnes derartiges Gerät würde zwar Jahrzehnte benötigen, um einer Landefähre vom Typ Apollo zu ermöglichen, wieder in die Mondumlaufbahn zu starten. Aber auf dem Mond, so Lavagna, könnte eine große Zahl solcher Reaktoren parallel arbeiten.

Aber was, wenn sich herausstellen sollte, dass der Abbau von Wasser auf dem Mond nicht profitabel ist? In diesem Fall könnte trotzdem eine Station entstehen, findet Matthias Maurer. Sie würde dann jedoch in erster Linie der Wissenschaft dienen: »Ohne eine kommerzielle Perspektive würde es lediglich erheblich länger dauern. Die Situation könnte sich ähnlich entwickeln wie in der Antarktis, wo es in erster Linie um Wissenschaft geht.«

Fest steht, dass manche Wissenschaftler begeistert von der Möglichkeit sind, vielleicht schon in einigen Jahren Experimente auf dem Mond durchführen zu können. Sie versprechen sich auch neue Erkenntnisse über die Entstehung des Erde-Mond-Systems. Solche könnten beispielsweise neue Gesteinsproben aus verschiedenen Mondkratern liefern. Das Material würde einen Blick zurück in die Zeit erlauben, in der das Sonnensystem noch in Aufruhr war und zahlreiche kleinere Himmelskörper mit dem Erdtrabanten kollidierten.

Die Forscher wollen außerdem den Wasserkreislauf auf dem Mond und dessen seismische Aktivität untersuchen. Und sie möchten gern ein Radioteleskop auf der erdabgewandten Seite des Mondes errichten, wo es gegen Störungen durch irdische Einflüsse abgeschirmt wäre. Damit ließe sich die Strahlung aus den Kindertagen des Kosmos viel eingehender analysieren als von der Erde aus.

Anders als in der Antarktis müssten sich Mondbewohner allerdings vor der kosmischen Teilchenstrahlung und vor kleinen Meteoriten schützen. Der Trabant der Erde besitzt weder eine schützende Atmosphäre noch ein Magnetfeld, das geladene Teilchen von der Oberfläche fernhält. So könnten die ersten Siedler zusammenbaubare Schutzunter-

künfte von der Erde mitbringen, sagt Maurer. Diese müssten dort dann mit einer meterdicken Schicht aus Sand oder Regolith bedeckt werden.

Es gäbe auch eine natürliche Lösung: Astronauten könnten Klippen, Canyons und Höhlen zum Schutz nutzen. Lavaröhren – durch früheren Vulkanismus entstandene Tunnel – wären eine andere Möglichkeit. Wissenschaftler haben Hinweise auf solch einen Tunnel in Radardaten des japanischen Orbiters Selene entdeckt. Auch Dichtemessungen der NASA-Sonde Grail weisen auf eine Struktur hin, die sich über viele Kilometer unter den Marius-Bergen hinzuziehen scheint. Auf der Kanareninsel Lanzarote üben Forscher daher bereits, Fahrzeuge durch Lavaröhren zu steuern.

Aus Mondgestein lassen sich Ziegel formen – der Mörtel für die ersten Mondhäuser?

Ein paar hundert Meter vom LUNA-Labor in Köln entfernt testet Matthias Sperl mit Geldern vom DLR und dem belgischen Luft- und Raumfahrtunternehmens SAS derweil eine ganz andere Idee: die Herstellung von Steinziegeln aus Regolith. Sperl bündelt dafür im Labor einen energiereichen Lichtstrahl auf einen münzgroßen Fleck, wodurch sich dieser auf 1100 Grad Celsius erwärmt. Dadurch verschmelzen Schichten aus Gesteinsstaub miteinander und bilden mit der Zeit dunkelgraue körnige Steine, ähnlich wie in einem 3-D-Drucker. Auf dem Mond ließe sich dieser Prozess mit gebündeltem Sonnenlicht durchführen, sagt Sperl.

Die Schichten vereinigen sich zwar nicht vollständig, aber die Steine besitzen bereits etwa ein Fünftel der Stabilität von Beton und sind damit vergleichbar mit Mörtel. Architekturfirmen konnten 2018 sogar zeigen, dass sich aus den Steinen Bögen, Kuppeln und andere robuste Strukturen bauen lassen. Laut Sperl könnten sie stabil genug sein, um Mondbeben zu überstehen. Auch würden sie das Gewicht von Schutt aushalten, der als Schutz gegen Strahlung oben drauf gepackt werden könnte.

Derzeit dauert es etwa fünf Stunden, um einen einzigen Ziegel zu produzieren. Doch mit mehr Sonnenlicht ließe sich der Vorgang beschleunigen, hoffen die beteiligten Forscher. Kollegen von ihnen versuchen unterdessen, Bausteine für Unterkünfte aus Regolith mit Hilfe von Mikrowellenöfen zu erzeugen oder das Mondmaterial mit von der Erde gelieferten Stoffen zu verbinden, zum Beispiel Polymeren.

Wissenschaftler haben sich auch schon viele Gedanken darüber gemacht, was die Bewohner eines Monddorfes essen würden. Dabei dürften selbst gezogene Gewächse eine Rolle spielen. Als Teil eines geschlossenen Ökosystems könnten Pflanzen organische Abfälle verwerten und Kohlendioxid in atembaren Sauerstoff umwandeln. Im Mai 2018 berichteten staatliche chinesische Medien, ein Team von Freiwilligen habe die Rekordzeit von 370 Tagen in einem solchen abgeschlossenen Ökosystem verbracht, einer simulierten Mondstation mit dem Namen »Mondpalast 1«. Die Bewohner sollen Pflanzen angebaut und Mehlwürmer gezüchtet haben – Letzteres für die Versorgung mit Proteinen.

Die Astronauten an Bord der Internationalen Raumstation ISS essen hin und wieder bereits Salat und anderes Blattgemüse, das im Weltall gewachsen ist. Im Rahmen des vom Kennedy Space Center betriebenen NASA-Projekts Veggie suchen Forscher derweil nach essbaren Pflanzen, die in geschlossenen Räumen besonders gut wachsen. Sie sollen reich an Nährstoffen sein, die bei Lagerung leicht verloren gehen, wie Vitamin C, Vitamin K und Kalium. Die Suche nach einem geeigneten Gewächs lieferte übrigens einen klaren Gewinner: Grünkohl. »Dieser Kraftspender schlägt alles andere«, sagt Trent Smith, der Projektmanager von Veggie.

Auf dem Mond könnten Astronauten gut bewässerte Pflanzen unter weißen und roten LED-Lampen ziehen. Ihr Mineral- und Vitaminanteil ließe sich dann über die Beleuchtung beeinflussen. Noch in diesem Jahr sollen Versuche an Bord der ISS zeigen, wie sich die Zusammensetzung von Tomaten durch das verwendete Licht ändert.

Mit weiteren Tests wollen Fachleute außerdem herausfinden, wie Pflanzen am besten unter dem Einfluss der in Regolith enthaltenen Metalle gedeihen. »Wir würden gern wissen, wie sich aus dem, was eigentlich Weltraumstaub ist, lebendiger Ackerboden machen lässt«, so Smith. Wenn Pflanzen auf Regolith wachsen sollten, ergänzt Veggie-Forscher Matthew Romeyn, »dann könnten wir plötzlich sogar Obstbäume anpflanzen, nicht nur Blattgemüse«.

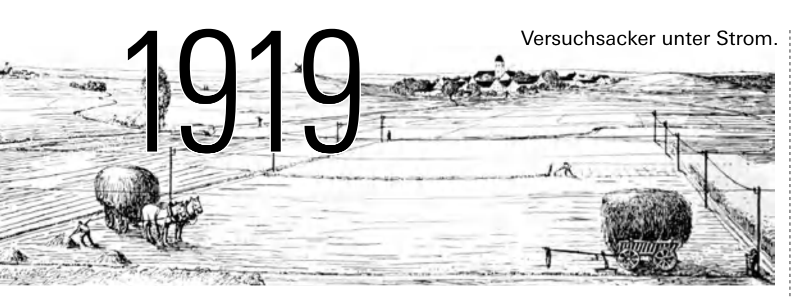
Vom Ergebnis dieser Tests dürfte viel abhängen: »Wenn Menschen wegen der Gefahren nur kurze Zeit auf der Mondoberfläche sein können und wenn es nicht möglich ist, vor Ort Nahrung zu produzieren, dann implodiert das ganze Vorhaben«, resümiert Mueller. Eine andere Barriere könnte rechtlicher Natur sein: Der 1967 von allen führenden Raumfahrtnationen verabschiedete Weltraumvertrag verbietet es Staaten, Himmelskörper oder Teile davon in Besitz zu nehmen. Die meisten Länder gingen heute davon aus, dass dies keineswegs den Abbau von Rohstoffen verhindert, sagt Dimitra Stefoudi, Expertin für Weltraumrecht an der Universität Leiden in den Niederlanden.

In den vergangenen Jahren haben die USA und Luxemburg bereits nationale Gesetze erlassen, die den Abbau von Rohstoffen im All erlauben, um so die junge Weltraumindustrie zu fördern. Russland und Belgien fordern dagegen ein neues internationales Rahmenrecht für derartige Aktivitäten. Der Vertrag von 1967 verlangt außerdem, dass sämtliche Aktivitäten im All allen Ländern und der gesamten Menschheit zugutekommen sollen. Unternehmen müssten also Mittel und Wege finden, ihr Knowhow und etwaige Gewinne durch Bergbau auf dem Mond zu teilen, sagt Stefoudi.

Letztlich werde der Aufbau einer Mondstation nicht von der Entwicklung der Technik abhängen, betont Mueller, sondern vom politischen Willen und den wirtschaftlichen Interessen: »Wenn wir das beides regeln können, dann bin ich mir sicher, dass es eine dauerhafte Besiedelung des Mondes geben wird.« ◂

www.nature.com
Nature 562, S. 474–478, 25. Oktober 2018

1919



Versuchsacker unter Strom.

WUNDERDÜNGER ELEKTRIZITÄT

»Die Engländer, denen es in den letzten Kriegsjahren gelungen ist, den Getreideertrag ihrer Insel wesentlich zu steigern, verdanken ihre Erfolge zum Teil der Anwendung der Elektrizität. Die Agricultural Electric Discharge Company Ltd. begann vor etwa 13 Jahren mit dem von Sir Oliver Lodge angegebenen Verfahren, die Feldfrüchte durch hochgespannten Gleichstrom zu bestrahlen. Das Verfahren hat sich sehr gut bewährt. Bei der neuesten Anordnung werden äußerst dünne Drähte netzartig über das zu behandelnde Feld gespannt. Möglicherweise wirkt die Elektrizität mittelbar als Düngemittel, indem sie die Bildung salpetersaurer Salze fördert. Die Elektrizität übt offenbar auch einen Einfluß auf den Pflanzenwuchs aus, indem sie die Nahrungsaufnahme der Pflanze auf noch nicht hinreichend geklärte Weise steigert.« *Die Umschau 25, S. 386–389*

ZEMENT STATT ZIEGEL

»Leider sind die Bestände an Ziegelsteinen sehr gering und die Erzeugung leidet durch den Mangel an Kohlen in hohem Masse. Wie in der Ausstellung ›Sparsame Baustoffe‹ gezeigt wurde, ist es gelungen, unter Verwendung von Zementplatten tragfähige Hohlwände herzustellen, die zurzeit billiger als Ziegelsteinmauerwerk werden. Auf diese Weise wird es möglich sein, eine grössere Anzahl Arbeitsuchender zu beschäftigen. Gebaut muss werden, denn die Wohnungsfrage zu lösen ist die dringlichste Aufgabe unserer Zeit.« *Gesundheit 11, S. 103*

KRIEG HÄRTET ZÄHNE

»Die Statistik für das letzte Jahr ist zwar noch nicht fertiggestellt, aber man kann schon jetzt rechnen, daß bei ungefähr 40% von 14000 untersuchten Kindern während der Kriegszeit eine große Besserung der Zähne eingetreten ist. Nach Dr. Bensow kann man den Rückgang in der Zahnfäule als unmittelbare Folge des Mangels an Brot aus feingesiebtem Mehl und an Süßigkeiten betrachten. Während der Kriegszeit wurde das Brot aus zusammengemahlenem Mehl gebacken, und durch die darin reichlich vorkommende Kleie sind mehr Kalk und Nährsalze den Zähnen zugeführt worden.« *Prometheus 1545, S. 288*

1969

GEFLÄZT VERDAUT SICH'S SCHNELLER

»Die alten Griechen nahmen ihre Mahlzeiten liegend ein. Der Grund könnte reine Bequemlichkeit sein; jedoch weisen neue Befunde darauf hin, daß die Griechen die liegende Stellung bewußt vorzogen. Bei den Experimenten wurde ein Schlauch durch die Nase in den leeren Magen von Versuchspersonen (Medizinstudenten) eingeführt. Hierbei zeigte sich, daß bei der Ansicht und dem Geruch von Speisen Magensäure sezerniert wurde. Doch spielt auch [das Hormon] Gastrin eine große Rolle bei der Anregung der Magensaftproduktion (wenigstens bei Hunden). Wenn Magensaft den Grund des Magens erreicht, hemmt er die Produktion von Gastrin. Durch die seitliche Körperlage wird verhindert, daß der vor dem Essen gebildete Magensaft in den unteren Teil des Magens gelangt. Größere Mengen von Magensaft [werden] gebildet. Als Folge kann eine Mahlzeit schneller verdaut werden.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 6, S. 269*

DER ERSTE SEINER GATTUNG?

»Der bekannte Anthropologe L. S. B. Leakey hat in der Oldoway-Schlucht Skeletteile eines Urmenschen gefunden, der vor etwa zwei Millionen Jahren gelebt haben muß. Leakey gab dem Wesen den Namen Homo habilis (habilis: lat. = tauglich, geschickt), da aus dem Knochenbau aufrechter Gang abgeleitet werden kann und offenbar die Herstellung von Geräten bekannt war. Die Hirnkapazität liegt mit etwa 680 Kubikzentimetern noch sehr nahe bei der der Zinjanthropus-Formen, so daß manche Fachleute die Skelettreste in diese Verwandtschaftsgruppe (Australopithecus) einordnen und nicht als Homo bezeichnen.« *Kosmos 6, S. 233*

KOSTBARE WÄRMELEITER

»Die Bell Telephone Laboratories haben erfolgreiche Versuche mit Diamanten des Typs IIa als Wärmeableiter für Halbleiterbauelemente durchgeführt. Das Kristallgitter ist ausschließlich mit Kohlenstoffatomen besetzt, was zu einer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit führt, so daß schon ein Kristall von der Größe eines Stecknadelkopfes bei verschiedenen Halbleitern eine dreifache Leistungssteigerung gewährleistet. Nach dem Spalten und Polieren werden die Diamanten an zwei gegenüberliegenden Seiten mit Titan, Gold oder Platin beschichtet. Durch Wärmepressen oder Löten stellt man dann eine Verbindung [mit] den metallbeschichteten Halbleiterdioden her.« *Elektronik 6, S. 182*

MATHEMATIK
DER TEILCHEN-CODE

Im größten Beschleuniger der Welt prallen Partikel nahezu mit Lichtgeschwindigkeit aufeinander. So entstehen enorme Datenmengen, die Physiker nach unerwarteten Ereignissen durchforsten. Dafür müssen die Wissenschaftler genau verstehen, was gängige Theorien vorhersagen – doch das ist alles andere als einfach.



OLA J. JOENSEN

Matthew von Hippel ist theoretischer Physiker am Niels-Bohr-Institut von der Universität Kopenhagen. Außerdem bloggt er auf Englisch unter 4gravitons.wordpress.com.

⏩ spektrum.de/artikel/1640028

AUF EINEN BLICK
NEUE MATHEMATIK FÜR DEN LHC

1 Um unerwartete Phänomene am Teilchenbeschleuniger zu finden, müssen Physiker genaue Wahrscheinlichkeiten für die Zusammenstöße und Reaktionen kennen.

2 Weil die dafür nötigen Berechnungen extrem kompliziert sind, nutzen so genannte Amplitudenforscher aktuelle Fortschritte aus der Mathematik.

3 Dadurch können Physiker nun mit der Präzision des LHC mithalten. Sie hoffen, Abweichungen von gängigen Theorien zu finden und so endlich die neuartigen Teilchen aufzuspüren, die sie schon lange erwarten.

Der Large Hadron Collider (LHC) in Genf ist die größte Maschine, die die Menschheit je gebaut hat. Die dort beschleunigten Protonen sind nur um ein millionstel Prozent langsamer als das Licht. Prallen die Teilchen bei dieser Schwindel erregenden Geschwindigkeit aufeinander, explodieren sie regelrecht: Sie zerfallen in ihre Bestandteile, Quarks und Gluonen, die sich anschließend zu neuen Teilchen zusammenfügen.

Auf diese Weise kamen die Wissenschaftler am CERN 2012 zu ihrem bislang bedeutendsten Ergebnis. Sie wiesen das lang ersehnte Higgs-Boson nach, das letzte fehlende Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik. Physiker hoffen allerdings, dass der LHC bald etwas wirklich Neues findet: bisher unbekannte Partikel, die zum Beispiel das Geheimnis der Dunklen Materie lüften oder Lösungen für andere offene Fragen bieten.

In Teilchenbeschleunigern prallen Partikel mit aberwitzigen Geschwindigkeiten aufeinander und verbinden sich zu neuen Teilchen.

Dazu wühlen sie sich jährlich durch 30 Petabyte an Daten, die während der Experimente entstehen. Sie suchen nach winzigen Abweichungen zu den gängigen Theorien, was auf neue physikalische Phänomene hindeuten würde. Dazu muss man natürlich wissen, was das Standardmodell genau vorhersagt.

Da kommen Theoretiker wie ich ins Spiel. Physiker können durch ihre Versuche nur Fragen beantworten, die mit Wahrscheinlichkeiten zu tun haben. Zum Beispiel: Wie groß ist die Chance, dass zwei Protonen aufeinanderprallen? Wie häufig entsteht dabei ein Higgs-Boson? Dafür brauchen sie so genannte Streuamplituden. Die Formeln dafür geben an, wie wahrscheinlich es ist, dass Teilchen aneinander abprallen (»streuen«). Ich gehöre zu einer Gruppe von Forschern, die versuchen, die aufwändigen Berechnungen zu vereinfachen oder überhaupt erst zu ermöglichen. Wir nennen uns daher auch »Amplitudenforscher«.

Unser Feld geht auf eine 1986 erschienene Arbeit der Physiker Stephen Parke und Tomasz Taylor zurück, die damals zusammen am Fermilab in Illinois arbeiteten. Es gelang ihnen zu der Zeit, die Kollision von beliebig vielen Gluonen durch eine einzige Formel zu beschreiben. Um solche komplizierten Streuprozesse zu berechnen, musste man sich zuvor mit seitenlangen Einzelfallbetrachtungen herumplagen. Als in den nächsten 20 Jahren eine Reihe neuer Methoden die schwierigen Gleichungen weiter verkürzte, blühte die Amplitudenforschung endgültig auf. Inzwischen boomt unser Fachgebiet: Die Konferenz »Amplitudes 2018« zählte 160 Teilnehmer, 100 junge Forscher besuchten zudem den davor stattfindenden einwöchigen Kurs. Selbst in einer Folge der beliebten Fernsehserie »The Big Bang Theory« erzählt der Sonderling Sheldon Cooper, dass er sich in der Amplitudenforschung versucht habe.

In den letzten Jahren haben wir enorme Fortschritte gemacht. Unsere Ergebnisse sind inzwischen so detailliert, dass sie mit der wachsenden Präzision des LHC mithalten. Damit können wir selbst kleinste Unterschiede zwischen den Vorhersagen des Standardmodells und der Realität erkennen und sind dadurch endlich in der Lage, nach Spuren von mysteriösen Teilchen zu suchen, von denen Physiker schon so lange träumen.

Diagramme aus Linien und Schleifen

Doch wie berechnet man Streuamplituden? Üblicherweise nutzen Wissenschaftler dafür so genannte Feynman-Diagramme, welche die extrem langen Formeln übersichtlicher gestalten. Diese 1948 vom berühmten Physiker Richard Feynman entwickelten Zeichnungen symbolisieren die möglichen Pfade, auf denen sich Teilchen während eines Streuprozesses bewegen können.

Angenommen, man möchte die Wahrscheinlichkeit dafür berechnen, dass sich zwei Gluonen zu einem Higgs-Boson verbinden. Dann zeichnet man zuerst die Pfade aller involvierten Teilchen: links zwei Eingangslinien für die Gluonen und rechts eine Ausgangslinie für das entstehende Higgs-Boson. Diese Pfade muss man anschließend nach den Regeln des Standardmodells miteinander verbinden. Die Theorie erlaubt es allerdings nicht, sie einfach zusammenzufügen, da aus zwei Gluonen niemals direkt ein Higgs-

Boson entsteht. Der Prozess kann aber über einen Umweg stattfinden. Die Gluonen können beispielsweise zu jeweils einem Quark-Antiquark-Paar zerfallen, aus denen schließlich ein Higgs-Boson hervorgeht. Zeichnet man die Quark-Pfade in das Diagramm, bilden sie eine Schleife (siehe »Feynman-Diagramm«, S. 71). Ein Teilchen, das sich in einer solchen Schleife bewegt, heißt »virtuell«. Denn es hat weder einen Ursprung noch ein Ende: Seine Eigenschaften können niemals in einem Experiment gemessen werden.

Um die Wahrscheinlichkeit dafür zu berechnen, dass zwei Gluonen zu virtuellen Quarks zerfallen und ein Higgs-Boson entsteht, braucht man nicht bloß die Energie und Geschwindigkeiten der echten Teilchen, sondern auch die der virtuellen Quarks. Aber woher soll man wissen, wie schnell sie sind und welche Energie sie haben? Tatsächlich gibt es darauf keine eindeutige Antwort. Diese Unschärfe taucht überall in der Quantenmechanik auf. So kann man zum Beispiel nicht den Ort und den Impuls eines Teilchens gleichzeitig genau bestimmen. Die Quantenmechanik lehrt uns aber auch, wie man mit dieser Ungewissheit umgeht: Man muss jede einzelne Möglichkeit in Betracht ziehen und die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten dafür aufsummieren. In unserem Fall müssen wir das für alle möglichen Geschwindigkeiten und Energien der virtuellen Quarks tun. Das funktioniert am besten mit einem Integral.

Damit ist man jedoch noch nicht fertig. Um die Streuamplitude dafür zu berechnen, dass aus der Kollision zweier Gluonen ein Higgs-Boson entsteht, muss man weiter gehen. Denn bevor sich die virtuellen Teilchen zu einem Higgs-Boson verbinden, könnten sie in virtuelle Gluonen zerfallen, die wieder in virtuelle Quark-Antiquark-Paare zerfallen, und so weiter. Um die gesamte Streuamplitude zu berechnen, braucht man jedes mögliche Feynman-Diagramm, das die realen Teilchen nach den Regeln des Standardmodells verbindet. Das sind unendlich viele: Man kann immer mehr Schleifen hinzufügen, wodurch zusätzliche und kompliziertere Integrale entstehen.

Kurz erklärt: Polynomiale und algebraische Gleichungen

Eine polynomiale Gleichung summiert die Vielfachen a_i von Potenzen einer Variablen x, zum Beispiel: $f(x) = a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_n x^n$. Eine algebraische Zahl löst stets eine polynomiale Gleichung mit ganzzahligen Koeffizienten a_i. Algebraische Gleichungen sind dagegen vielfältiger. Im strengen mathematischen Sinn sind sie Lösungen einer polynomialen Gleichung. Häufig lassen sie sich daher als Multiplikation, Division, Summe oder Differenz von Polynomen darstellen. Feynman-Diagramme führen immer zu Integralen über eine algebraische Gleichung, weshalb ihre Lösung eine Periode ist.

Doch glücklicherweise gibt es einen Ausweg: Wegen der geringen Stärke der quantenmechanischen Kräfte muss man meist nur wenige Diagramme tatsächlich ausrechnen. Wenn Teilchen miteinander wechselwirken, verbindet man ihre Linien im Feynman-Diagramm. Das betreffende Integral multipliziert man dann mit der Stärke dieser Wechselwirkung. Für Elektrizität und Magnetismus ist der Wert beispielsweise sehr klein: Für jede Schleife, die einen zusätzlichen Verbindungspunkt schafft, teilt man das Ergebnis durch etwa 137. Je mehr Schleifen ein Diagramm also hat, desto kleiner wird sein Beitrag – bis Experimente ihn schließlich nicht mehr auflösen können.

Die genauesten Experimente in den Naturwissenschaften sind solche, die elektromagnetische Eigenschaften untersuchen. Wissenschaftler können ihre Ergebnisse auf bis zu zehn Dezimalstellen exakt messen. Um auf theoretischer Seite so weit zu kommen, braucht es »nur« vier Schleifen, das heißt vier Faktoren von $1/137$. In einigen Fällen haben Forscher diese Werte berechnet, und alle zehn Dezimalstellen stimmen mit den Laborergebnissen überein.

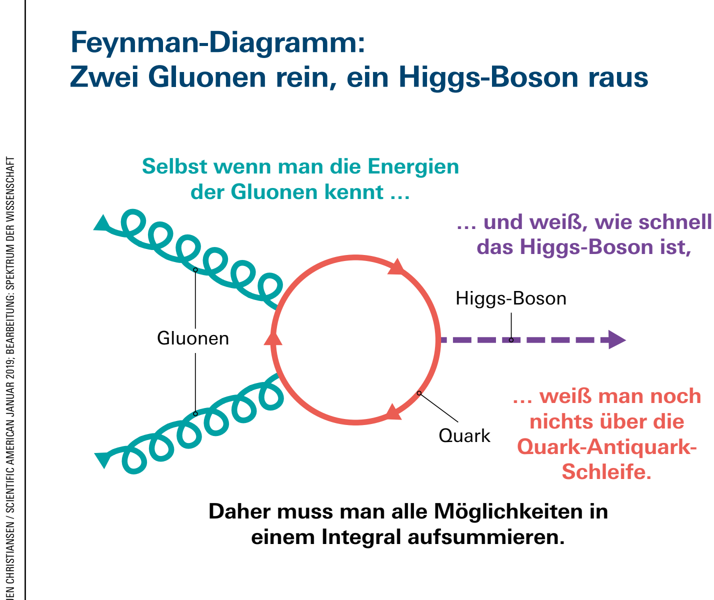
Die starke Kernkraft, die Quarks unter anderem zu Protonen und Neutronen zusammenklebt, ist da schon komplizierter. Für die Prozesse am LHC bedeutet jede Schleife, dass man die Integrale durch zehn teilen muss. Um eine Präzision von zehn Dezimalstellen zu erreichen, bräuchte man also zehn Schleifen.

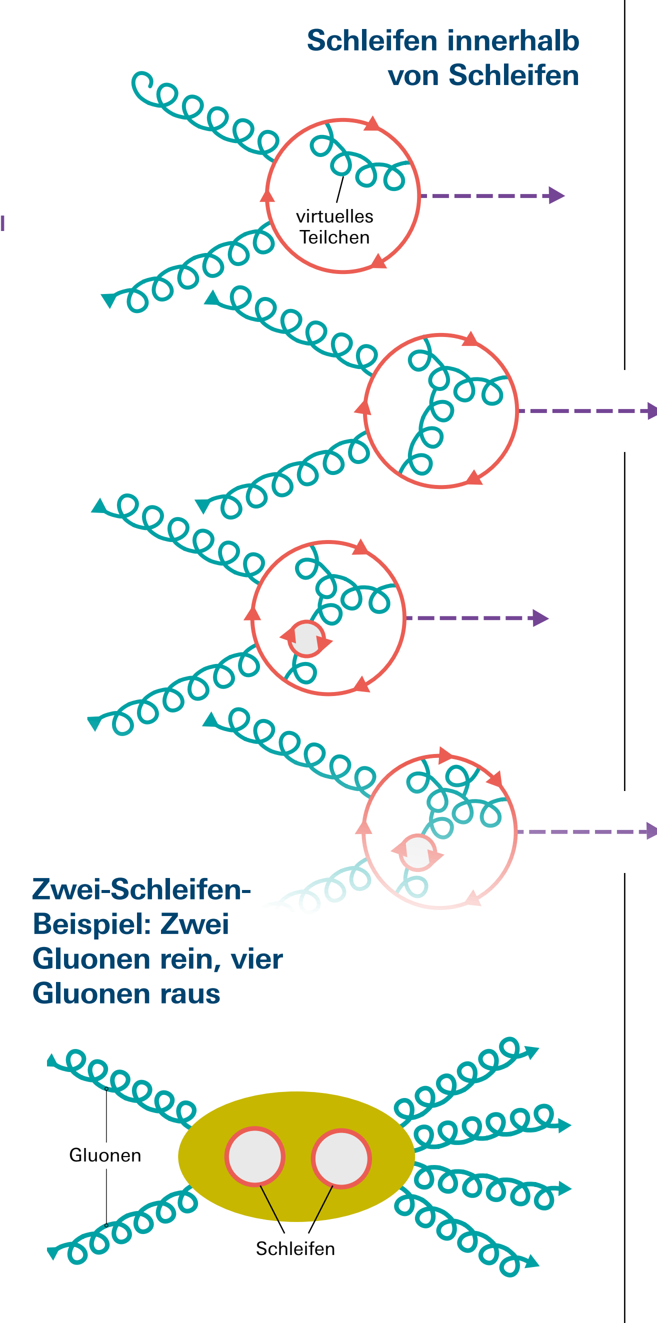
Zwei Schleifen für die starke Wechselwirkung

Allerdings ist der LHC bei Weitem nicht so exakt wie die Experimente zum Elektromagnetismus. Der Beschleuniger erreicht gerade einmal eine Genauigkeit von zwei bis drei Schleifen. Für die starke Kernkraft sind solche Formeln bereits so schwierig, dass man sie ohne Vereinfachungen meist nicht berechnen kann. Diese Erfahrung machten 2010 Vittorio Del Duca, heute an der ETH Zürich, Claude Duhr, der damals an der University of Durham arbeitete, und Vladimir Smirnov von der Staatlichen Universität Moskau. Sie wollten wissen, wie wahrscheinlich es ist, dass zwei Gluonen am LHC kollidieren und dabei vier Gluonen herauskommen. Selbst mit einer vereinfachten Theorie und einigen trickreichen Abkürzungen füllt ihre Zwei-Schleifen-Formel 17 Seiten mit komplizierten Integralen. Das verwunderte damals niemanden; jeder wusste, dass solche Berechnungen extrem schwierig sind.

Einige Monate später kam die große Überraschung. Die Physiker Marcus Spradlin, Cristian Vergu, Anastasia Volovich und der Mathematiker Alexander B. Goncharov, damals alle an der Brown University in Rhode Island, stellten die gleiche Gluonenkollision in bloß zwei Zeilen dar. Dafür nutzten sie einen mathematischen Trick, der den meisten Amplitudenforschern bis dahin nicht bekannt war.

Zeigt man einem Mathematiker ein Integral, das sich aus einem Feynman-Diagramm ergibt, wird er als Erstes sagen: »Das ist eine Periode.« Perioden sind eine abstrakte Art von Zahlen. Die wohl einfachsten Zahlen sind die natürlichen, gefolgt von den rationalen Zahlen. Irrationale Zahlen sind schon komplizierter, denn sie lassen sich nicht mehr als Quotient zweier ganzzahliger Zahlen darstellen. Ein Beispiel





dafür ist die Wurzel aus zwei. Anders als π zählt sie zu den »algebraischen Zahlen«: Sie ist die Lösung einer polynomialen Gleichung mit ganzzahligen Koeffizienten (siehe »Kurz erklärt«, links), in diesem Fall $x^2 = 2$. Perioden sind Zahlen, die keine solche Gleichung erfüllen müssen. Dafür kann man sie aber immer durch ein Integral über eine algebraische Funktion berechnen.

Die meisten Menschen verstehen unter Perioden etwas anderes. Tatsächlich tragen die seltsamen Zahlen nicht zufällig diesen Namen. Im einfachsten Fall beschreiben sie tatsächlich die kürzeste Distanz, bis sich etwas wiederholt. Um das zu verstehen, helfen der Cosinus und der Sinus. Man kann sie mit imaginären Zahlen (Wurzeln negativer Zahlen) verbinden, indem man die eulersche Formel verwendet: $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$, wobei e die eulersche Zahl ist und i die Quadratwurzel aus minus eins. Alle drei Funktionen, $\sin(x)$, $\cos(x)$ und e^{ix}, haben die Periode 2π: Wenn x von 0 auf 2π steigt und dann weiter anwächst, wiederholen sich die jeweiligen Funktionswerte.

Die Zahl 2π löst zwar keine algebraische Gleichung, lässt sich aber durch ein Integral berechnen. Zeichnet man ein Diagramm von e^{ix} in der komplexen Ebene, mit den imaginären Zahlen auf einer Achse und den reellen Werten auf der anderen, dann bildet die Funktion einen Kreis mit Radius eins (siehe »Visualisierung der eulerschen Formel«, S. 72). Indem man jedes Liniensegment des Kreises mit Hilfe eines Integrals addiert, erhält man seinen Umfang, nämlich 2π.

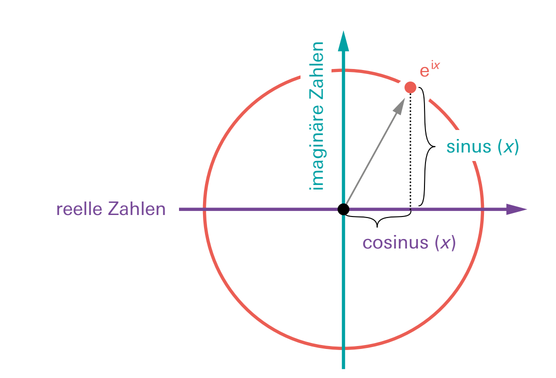
Doch was passiert, wenn man nur die Länge eines Bogenstücks bis zu einem gewissen Punkt z berechnen möchte? In diesem Fall muss man die Gleichung $z = e^{ix}$ nach der Variablen x auflösen, die der gesuchten Bogenlänge entspricht. Dafür braucht man den natürlichen Logarithmus $\ln(z)$. Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man die einzelnen Liniensegmente des Kreises bis zum Punkt z aufsummiert. Die Lösung des Integrals ist also ein Logarithmus – daher sind Logarithmen Perioden, auch wenn sie im Gegensatz zu 2π nicht danach aussehen.

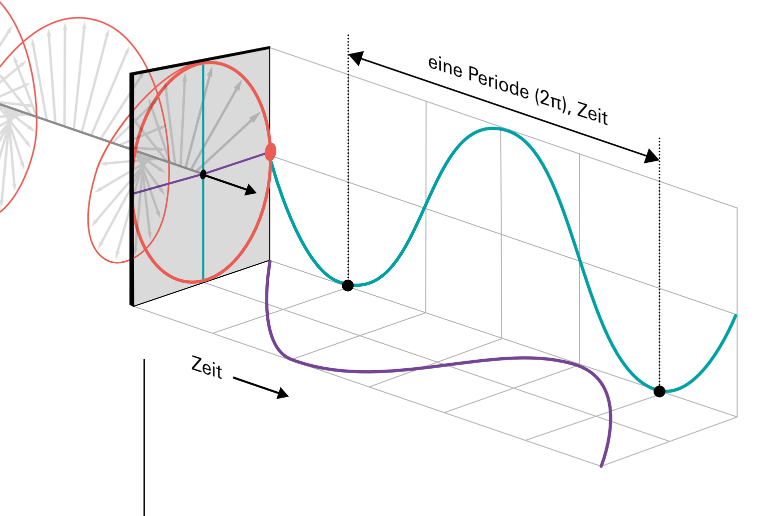
Im Allgemeinen können Perioden allerdings viel komplizierter sein als die beiden Beispiele. In den letzten 25 Jahren haben Physiker eine Schwindel erregende Anzahl exotischer Zahlen gefunden (siehe **Spektrum** August 2017, S. 66), als sie die Integrale von Feynman-Diagrammen berechneten. Erstaunlicherweise lassen sich viele solcher Perioden in Logarithmen zerlegen.

Diese Eigenschaft nutzte Goncharov 2010, wodurch er mit seinem Team das 17-seitige Durcheinander von Del Duca und dessen Kollegen durch eine Art Alphabet aus Logarithmen ausdrücken konnte. Das Alphabet gehorcht einer eigenen Grammatik, die auf logarithmischen Rechenregeln basiert, wie $\ln(xy) = \ln(x) + \ln(y)$ oder $\ln(x^n) = n \ln(x)$.

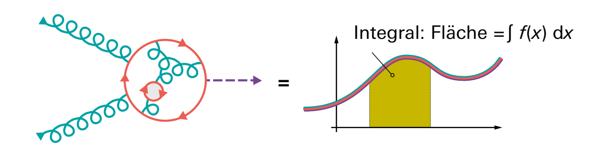
Visualisierung der eulerschen Formel

$$e^{ix} = \text{cosinus}\,(x) + i\,\text{sinus}\,(x)$$





Mit Goncharovs Trick lässt sich das komplizierte Integral eines Feynman-Diagramms …



… durch einfache Buchstaben ausdrücken, die sich wie Logarithmen verhalten.



Die Buchstaben gehorchen einer »Grammatik«, die auf den Rechenregeln für Logarithmen basiert.

natürlicher log — $\ln(AB) = \ln(A) + \ln(B)$

Zum Beispiel ist der log von A mal B gleich dem log von A plus dem log von B.

C F AB E D = C F A E D + C F B E D

Und der log von C hoch n entspricht n mal dem log von C.

$$\ln(C^n) = n \cdot \ln(C)$$

Nach diesen Regeln können wir die Wörter für Feynman-Diagramme umschreiben.

D A C^n B A = n · D A C B A

JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Zusammengefasst bedeutet das: Physiker berechnen Streuamplituden mit Feynman-Diagrammen, die Integrale erfordern. Diese Integrale sind wiederum Perioden, die man oftmals in einfachere Logarithmen zerlegen kann. Dadurch ist es möglich, die Integrale durch Buchstaben auszudrücken, die logarithmischen Rechenregeln folgen.

Goncharovs Trick wäre aber nicht annähernd so beeindruckend, wenn er bloß Platz sparen würde. Kennt man das richtige Alphabet, kann man die Feynman-Diagramme komplett überspringen und die Formel einer Streuamplitude einfach erraten. Das erleichtert nicht nur die Arbeit der Physiker, sondern macht einige Berechnungen überhaupt erst möglich.

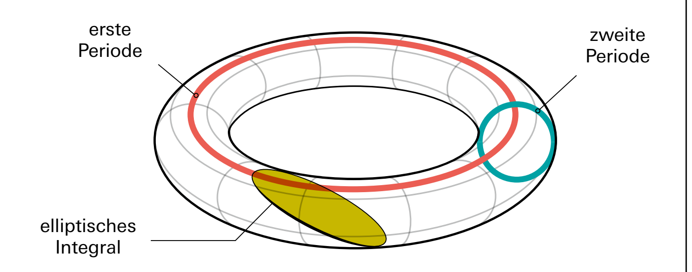
Die Buchstaben muss man dafür wie bei Scrabble so anordnen, dass ein sinnvolles »Wort« entsteht. In unserem Fall ist es sogar etwas einfacher, da wir bereits wissen, wie lang das gesuchte Wort sein soll. Wenn man faul ist, kann man einen Computer die Buchstaben in jeder möglichen Reihenfolge aufschreiben lassen und diese Liste nach einer Lösung durchsuchen.

Die Liste kann jedoch ziemlich lang sein. Glücklicherweise gibt uns das Standardmodell weitere Hinweise auf die Antwort. Bestimmte Wörter kann man sofort aussortieren, weil sie Teilchen beschreiben, die es nicht gibt, oder Diagramme repräsentieren, die unmöglich zu zeichnen wären. Andere Ergebnisse erklären wiederum Dinge, die wir bereits wissen. Auf sie kann man ebenso verzichten. Am Ende bleibt von den Millionen Wörtern nur noch eine einzige Antwort übrig, die der gesuchten Streuamplitude entspricht.

Lance J. Dixon, heute am Stanford Linear Accelerator Center, und James M. Drummond von der University of Southampton nutzten diese Methode 2011 zusammen mit Johannes Henn, damals an der Humboldt-Universität zu Berlin und inzwischen an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, um das richtige »Wort« für eine Drei-Schleifen-Berechnung zu finden. Als ich zwei Jahre später während meiner Doktorarbeit an der Stony Brook University auf Long Island von ihrer Forschung erfuhr, entschied ich mich, den Winter über mit Dixon an der Stanford University zu arbeiten. Wir wollten herausfinden, wie das Drei-Schleifen-Ergebnis aussieht, wenn man alle Buchstaben detailliert in Integrale umschreibt, um es dann mit der Zwei-Schleifen-Berechnung von Del Duca und seinen Kollegen zu verglei-

JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Elliptisches Integral um einen Torus



Auf einem Torus gibt es zwei unterschiedliche Perioden (rot und blau), deren jeweilige Durchmesser durch ein einfaches Integral berechenbar sind. Möchte man dagegen die Bogenlänge einer Ellipse (gelb) berechnen, ergibt sich ein kompliziertes elliptisches Integral.

chen. Die zusätzliche Schleife führt dazu, dass sich die Formel nicht über 17, sondern über mehr als 800 Seiten erstreckt.

Inzwischen haben sich weitere Wissenschaftler unserem Team angeschlossen, um noch mehr Feynman-Diagramme miteinzubeziehen. Wir knabbern nun schon an sieben Schleifen, und ich weiß nicht, wie viele Seiten die neuen Formeln benötigen, wenn man sie wirklich ausschreibt. Bei diesen komplizierten Fällen reicht nicht einmal mehr Goncharovs Methode aus, um die Ergebnisse ausreichend zu vereinfachen. Daher speichern wir sie in Computerdateien, die so groß sind, dass man meinen könnte, es handle sich um Videos und nicht um Text. Doch ohne Goncharovs Trick wären solche detaillierten Berechnungen gar nicht möglich.

Verkeilte Integrale

Je mehr Schleifen wir berücksichtigen, desto genauer wird unsere Vorhersage. Wozu braucht man aber so viele davon? Der LHC erreicht bloß die Genauigkeit von zwei oder drei Schleifen. Mit unseren Ergebnissen wären wir sogar präziser als der aktuelle Stand des Elektromagnetismus. Allerdings hat die Sache einen Haken: In den Sieben-Schleifen-Berechnungen verwenden wir ein vereinfachtes Modell unserer Welt, in dem die quantenmechanischen Wechselwirkungen weniger kompliziert sind. Eine der schönsten Eigenschaften des Modells ist, dass Goncharovs Trick immer funktioniert: Wir können die Integrale stets in ein Alphabet von Logarithmen zerlegen.

In der realen Welt stößt diese Taktik aber schon bei zwei Schleifen auf Probleme. Denn die Integrale können sich »verfangen«, so dass man sie nicht voneinander trennen kann. Solche »elliptischen Integrale« stellen uns vor große Herausforderungen. Man kann sich das Phänomen wie bei zwei Ringen vorstellen, die sich nicht auseinanderziehen lassen. Bewegt man den einen Ring um den anderen, zeichnet sich eine donutförmige Fläche (»Torus«) ab, die gewissermaßen zwei separate Perioden hat: Integriert man um jeweils einen der beiden Kreise, erhält man einen Logarithmus. Doch auf dem Torus zeichnen sich nicht bloß Kreise, sondern auch Ellipsen ab. Möchte man die Bogenlänge einer solchen »elliptischen Kurve« berechnen, fällt das Ergebnis wesentlich komplizierter aus als ein Logarithmus (siehe »Elliptisches Integral um einen Torus«, links).

Elliptische Kurven tauchen bei vielen mathematischen Problemen auf. Manche davon sind so schwer zu lösen, dass beispielsweise die National Security Agency sie nutzt, um geheime Informationen zu codieren. Unsere Probleme sind zwar nicht ganz so hartnäckig, aber trotzdem knifflig.

Mit zunehmender Präzision des LHC werden auch elliptische Integrale immer wichtiger. Wegen verschiedener technischer Aufrüstungen pausiert der Teilchenbeschleuniger zwar seit Ende 2018, die Forscher müssen jedoch noch etliche Daten untersuchen, bevor er 2021 wieder in Betrieb geht. Dann wird der LHC zehnmal mehr Kollisionen produzieren als zuvor. Das spornt Wissenschaftler auf der ganzen Welt an, sich mit elliptischen Integralen zu befassen – und sie haben schon erhebliche Fortschritte erzielt.

Insgesamt entwickelt sich unser Forschungsgebiet rasend schnell. Im Winter 2017 habe ich mich zwei Wochen lang mit meinen Kollegen Andrew J. McLeod, Jacob L. Bourjaily, Matthias Wilhelm und Spradlin in der Princeton University eingesperrt, um einen unserer Entwürfe so schnell wie möglich fertig zu stellen. In der kurzen Zeit konnten wir eine vollständige Veröffentlichung ausarbeiten, in der wir eine Streuamplitude mit elliptischen Integralen berechnet haben. So schnell habe ich noch nie ein Paper geschrieben! Und dennoch befürchteten wir die ganze Zeit über, dass uns eine andere Gruppe zuvorkommen könnte.

Kurz darauf erhielten wir ein vorzeitiges Weihnachtsgeschenk: Lorenzo Tancredi vom CERN und seine Kollegen fanden einen einfacheren Weg, um mit den elliptischen Integralen zurechtzukommen, indem sie sich auf eine frühere Arbeit der Mathematiker Francis Brown von der University of Oxford und Andrey Levin von der Higher School of Economics in Moskau bezogen. Zusammen mit einer späteren Veröffentlichung von Brenda Penante vom CERN lieferte uns das das fehlende Puzzlestück: ein Alphabet »elliptischer Buchstaben«.

Mit diesem Werkzeug können wir Goncharovs Trick nun auch auf komplexere Integrale anwenden. Damit fangen wir langsam an, Zwei-Schleifen-Amplituden in der realen Welt zu verstehen statt bloß im vereinfachten Modell. Unsere Vorhersagen können wir bald mit den Daten des LHC vergleichen. Falls sie nicht übereinstimmen, hätten wir erstmals einen Hinweis darauf, dass etwas wirklich Neues vor sich geht. ◂

QUELLEN

Bourjaily, J.L. et al.: Elliptic double-box integrals: massless scattering amplitudes beyond polylogarithms. Physical Review Letters 120, 2018

Dixon, L.J. et al.: Bootstrapping six-gluon scattering in planar N=4 super-Yang-Mills theory. ArXiv 1407.4724, 2014

Goncharov, A.B. et al.: Classical polylogarithms for amplitudes and Wilson loops. Physical Review Letters 105, 2010

OLLO / GETTY IMAGES / ISTOCK

VERKEHR
WAS BRINGT EIN TEMPOLIMIT?

Immer wieder wird in Deutschland über den Nutzen einer generellen Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen diskutiert. Das würde vermutlich zu weniger Verkehrstoten führen und die Emissionen von Kohlendioxid und Feinstaub reduzieren. Doch die Daten bieten Interpretationsspielraum, und die Effekte sind womöglich kleiner, als viele denken.



Christopher Schrader ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

spektrum.de/artikel/1640030

Braucht die deutsche Straßenverkehrsordnung einen Zusatz, der auf Autobahnen eine Höchstgeschwindigkeit festlegt? Die Debatte zu dem Thema wird schnell emotional und ist allein schon deswegen schwierig zu führen. Sie krankt aber auch an einem Mangel aktueller Daten und Studien aus Deutschland dazu, was eine solche Einschränkung bewirken könnte. Hilfe von außen ist kaum zu erwarten: Alle Nachbarländer haben seit Langem Tempolimits auf ihren Autobahnen. Sie reden und forschen höchstens darüber, ob sie die Begrenzung etwas lockern oder weiter verschärfen.

Hier zu Lande stammen zwei wichtige Untersuchungen aus den Jahren 1999 und 2007 und beruhen auf noch älteren Daten. Interpretationen, Plausibilitätsbetrachtungen, Abschätzungen und Extrapolationen sind in der Diskussion darum genauso bedeutsam und präsent wie Zahlen. Auf der Suche nach Antworten auf Fragen zum Tempolimit auf Autobahnen muss man deshalb eine Schneise durch den Dschungel schlagen und läuft doch stets Gefahr, dass am Ende beide Seiten durch geschickte Auswahl der Argumente ihre Position bestätigt sehen.

Zur Frage, ob ein Tempolimit dem Klima nützt, gibt es in Deutschland nur eine einschlägige Studie. Sie ist 1999 vom Umweltbundesamt (UBA) erstellt worden und stützt sich auf Daten von 1992. Damals fuhren die Autos im Mittel 120, und 15 Prozent der Autos hatten ein Tempo von mehr als


OLLO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Staus behindern die Fahrt mehr als ein Tempolimit. Ob Letzteres dabei helfen könnte, Erstere zu verringern, ist unter Experten umstritten.

148 Kilometern pro Stunde. Inzwischen ist eine Untersuchung der Bundesanstalt für Straßenwesen bekannt geworden, dass sich zwischen 2010 und 2104 an diesen Fahrdaten nicht viel geändert hatte.

Die UBA-Studie berechnete für das Jahr 1996: Ein Tempolimit auf Autobahnen von 120 Kilometern pro Stunde würde etwa neun Prozent der Emissionen oder 2,2 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr einsparen. Im Jahr 2005 könnten es sogar drei Millionen Tonnen sein, so schätzte man seinerzeit, vor allem weil im Osten Deutschlands dann auf sanierten oder neuen Autobahnen weniger Geschwindigkeitsbegrenzungen gelten würden als bei Abschluss der Studie. Praktisch die gleichen Reduktionen schrieb die Behörde in einer Studie von 2010 für 2020 und 2030 fort – ohne aktuelle Zahlen erhoben zu haben.

Langsam für gute Luft

Drei Millionen Tonnen CO_2 mögliche Einsparung: Sollte die Zahl noch stimmen, wären das immerhin 2,6 Prozent des gesamten gegenwärtigen Ausstoßes im Straßenverkehr. Dieser lag 2017 laut Statistischem Bundesamt bei 115 Millionen Tonnen und ist allein in den 2010er Jahren um sechs Prozent gewachsen, weil mehr und größere Autos längere Strecken fahren.

Nach einer ersten Schätzung des UBA allerdings sind die Emissionen im Verkehr 2018 zum ersten Mal seit Längerem um einige Millionen Tonnen gefallen, unter anderem weil Treibstoffe für Autos teurer geworden sind. Ob die 20 Jahre alte amtliche Schätzung zur Einsparung durch ein Tempolimit auf Autobahnen heute noch brauchbar ist, dazu gibt es zwei Überschlagsrechnungen. Sie stammen vom ADAC und dem Öko-Institut – viel weiter auseinander in ihren Grundeinstellungen können Autoren kaum liegen.

AUF EINEN BLICK
VIEL BEFINDEN, WENIG EVIDENZ

1 Wichtige Untersuchungen zum Nutzen eines Tempolimits auf deutschen Autobahnen beruhen auf älteren oder stichprobenartigen Datensätzen. Die Debatte ist darum auf begründete Abschätzungen angewiesen.

2 Beim CO_2 könnte eine Begrenzung auf 120 Kilometer pro Stunde eine jährliche Ersparnis von etwa drei Millionen Tonnen bringen. Auch das Unfallrisiko dürfte sinken, doch wie stark, ist schwieriger zu beurteilen.

3 Potenzielle positive Auswirkungen sind einerseits plausibel, andererseits aber voraussichtlich schwer nachzuweisen. Ein rasches Ende der Diskussion ist darum nicht in Sicht.

Beide benutzen ein Zahlenwerk des Umweltbundesamts namens HBEFA, kurz für das Handbuch der Emissionsfaktoren. Hier kann man den durchschnittlichen Ausstoß für verschiedene Geschwindigkeiten ablesen. Der ADAC rechnet sein Resultat einer möglichen CO_2-Reduktion durch ein Tempolimit nicht explizit vor, sondern spricht als »Ergebnis einer Abschätzung« von »deutlich weniger als drei Millionen Tonnen«.

Beim Öko-Institut lassen sich die Zahlen besser nachvollziehen: Demnach stoßen Autos je Kilometer bei einem Tempo von mehr als 130 Kilometern pro Stunde um 19 Prozent mehr CO_2 aus als die gleichen Fahrzeuge bei 120. Dann braucht man noch den Anteil der Strecken ohne Tempolimit (etwa 70 Prozent) und der Fahrer, die sich an eine Begrenzung halten würden (80 Prozent). Daraus errechnet das Öko-Institut in einer Studie für den Thinktank Agora Verkehrswende in Berlin eine mögliche Reduktion der Emissionen im Straßenverkehr von 2 bis 3,5 Millionen Tonnen CO_2 für ein Limit von 120. Liege die Grenze bei 130, dann sei die Einsparung gut halb so hoch.

In Ermangelung einer besser begründeten Zahl bleibt es also bei der theoretischen Ersparnis von etwa drei Millionen Tonnen CO_2 durch ein Tempolimit von 120 Kilometern pro Stunde. Eigentlich, so stellte 2017 der Sachverständigenrat für Umweltfragen fest, genüge sowieso die Physik, um die Frage nach potenziellen Treibhausgaseinsparungen bei reduziertem Tempo zu beantworten: »Da mit einer Verdoppelung der Geschwindigkeit eine Vervierfachung des Luftwiderstands verbunden ist, hilft die Einführung einer allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung, die Verbräuche drastisch zu senken und den Schadstoffausstoß von Fahrzeugen zu verringern.«

Verbrennungsmotoren stoßen neben dem CO_2 weitere Gase aus, mit denen sie sich direkt auf die Luftqualität auswirken. Bei Dieselmotoren hängt die Menge der Stickoxide (NO_x) im Abgas vor allem von der Temperatur ab – also auch der Leistung, die das Aggregat erzeugen muss. Darum steigt die Emission der Schadstoffe bei Geschwindigkeiten über 100 Kilometern pro Stunde steil an. Dem Handbuch der Emissionsfaktoren zufolge kann sich der Ausstoß zwischen dem Optimum bei etwa 80 Kilometer pro Stunde auf der Landstraße und einem Autobahntempo von 140 verdoppeln.

Das genauer zu beleuchten, war Anfang der 2010er Jahre eines der Ziele im Umweltbundesamt-Forschungsprojekt Parest. Für ein Tempolimit von 120 Kilometern pro Stunde auf Autobahnen kamen die Autoren durch eine Modellierung auf eine mögliche NO_x-Reduktion von 5428 Tonnen. Das läge im Bereich von gut einem Prozent der gesamten Emissionen im Verkehr, und da Stickoxide vor allem lokal zum Problem werden, ist das höchstens auf Stadtautobahnen relevant – wo es ohnehin Tempolimits gibt. Feinstaub der beiden Größenklassen bis 2,5 und bis 10 Mikrometer könnte ein Tempolimit um jeweils 27 Tonnen mindern, ebenfalls ein Effekt von etwa einem Prozent. Solche Partikel werden mit dem Wind weiter transportiert als NO_x, aber Messstationen an kritischen Innenstadtstraßen zeigen, dass die Grenzwerte zurzeit eingehalten werden.

Ein Tempolimit könnte Sicherheit bringen – doch wie viel mehr, ist unklar

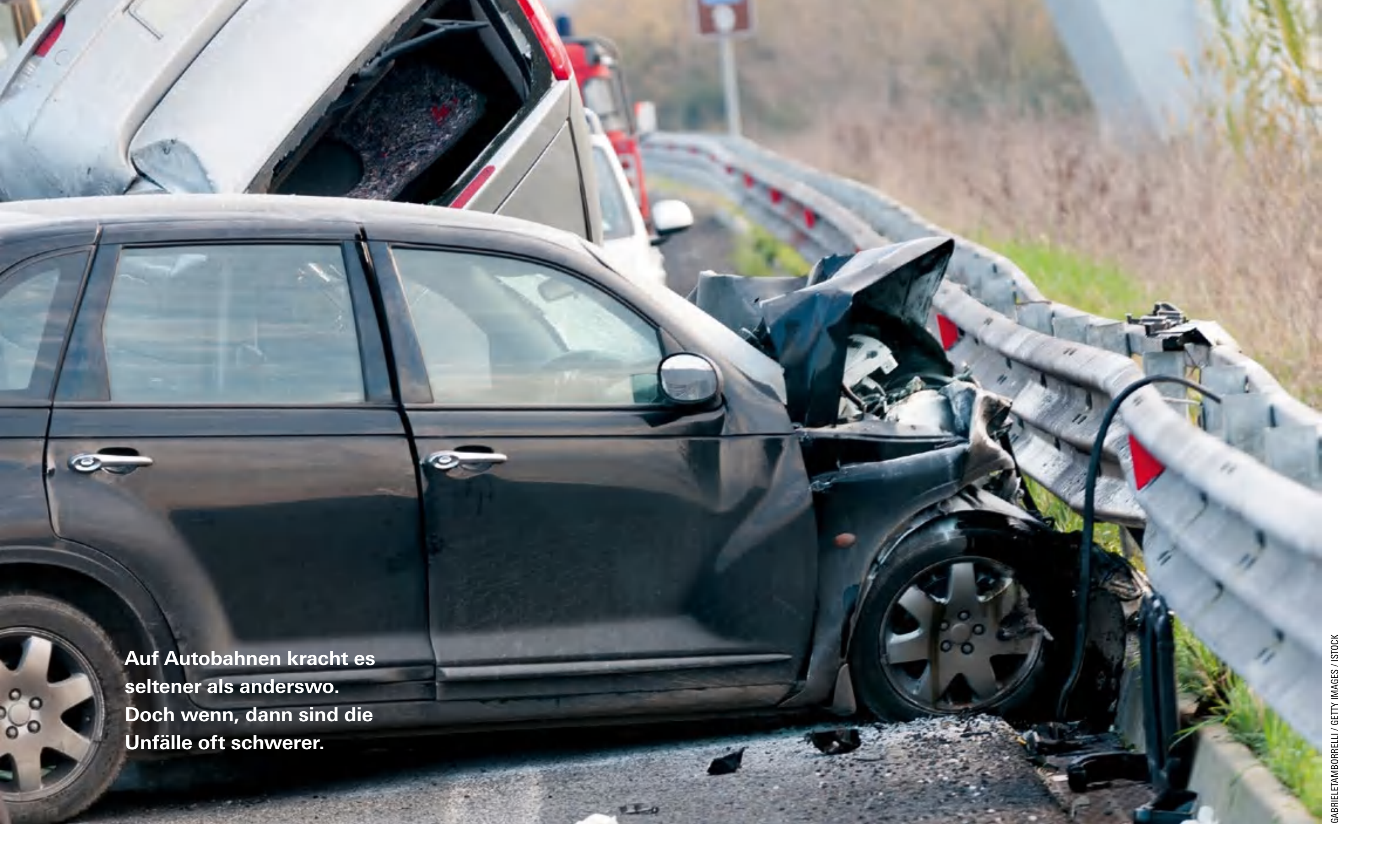
Ein für die Gesundheit der Menschen viel wichtigerer Aspekt der Debatte sind Verkehrsunfälle. Auf der Autobahn A24 Hamburg-Berlin gilt seit Ende 2002 auf der stark befahrenen Strecke zwischen den Autobahndreiecken Wittstock-Dosse und Havelland Tempo 130. Die Auswertung der Jahre davor und danach in einer Studie aus dem Landesbetrieb Straßenwesen in Brandenburg gilt als bestes Beispiel dafür, dass ein Tempolimit Leben retten kann. Die Zahl der Unfälle ging um 48 Prozent, die der Verunglückten um 57 Prozent zurück.

Allerdings muss man diese Zahlen ins Verhältnis zur allgemeinen Entwicklung in Brandenburg setzen. Die Autoren der Studie wählten dazu die »Unfallkostenrate«. Sie gibt die Höhe der volkswirtschaftlichen Schäden pro 1000 Fahrzeugkilometer an und lag vor Einführung des Tempolimits bei 22 Euro. Danach sank sie um 50 Prozent auf 11 Euro. Auf vergleichbaren Autobahnstücken, etwa anderen Teilen der A24, verbesserte sich die Sicherheit hingegen auch ohne Eingriff ebenfalls. Die Unfallkostenrate sank in der Kontrollgruppe um 23,5 Prozent. Das schmälert den rechnerischen Effekt des Tempolimits von der Hälfte auf ein gutes Viertel.

Neben einem solchen Fall, der wie ein Experiment ausgewertet wurde, kann man die Gesamtheit der Autobahnen betrachten. Sie sind einerseits die sichersten Straßen: 246 der rund 750 Milliarden gefahrenen Kilometer pro Jahr werden hier zurückgelegt, zeigt die Datensammlung »Verkehr in Zahlen des Bundesverkehrsministeriums«, also 32 Prozent. Laut Statistischem Bundesamt passierten auf Autobahnen aber nur sieben Prozent der Unfälle mit Personenschaden, und auf ihnen waren 13 Prozent der Verkehrstoten zu beklagen: 409 von 3180.

Andererseits liegt die Unfallursache auf Autobahnen in mehr als jedem dritten Fall in überhöhter Geschwindigkeit; insgesamt gilt das nur für jede achte Kollision. »2017 kamen schätzungsweise 80 Menschen auf Autobahnabschnitten ohne Tempolimit zu Tode, weil sie mit nicht angepasster Geschwindigkeit unterwegs waren«, sagte Siegfried Brockmann, Leiter der Unfallforschung beim Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft, im Januar 2019 dem »Tagesspiegel«.

Ob das aber tatsächlich am fehlenden Tempolimit lag, lässt sich der Statistik nicht entnehmen. Das Statistische Bundesamt vergleicht für 2017 die Unfälle auf Autobahnabschnitten mit und ohne Tempolimit (ohne Baustellen). Auf zirka 70 Prozent der Strecken ist die Geschwindigkeit unbe-



Auf Autobahnen kracht es seltener als anderswo. Doch wenn, dann sind die Unfälle oft schwerer.

GABRIELETAMBORRELLI / GETTY IMAGES / ISTOCK

grenzt, dort kamen in dem Jahr insgesamt 277 der 409 Getöteten ums Leben, das sind 68 Prozent; für die knapp 6000 Schwerverletzten lag die Quote bei 69 Prozent. Auch bei den Unfällen, bei denen mindestens einem Beteiligten »nicht angepasste Geschwindigkeit« vorgeworfen wurde, sind die Werte ähnlich. Der ADAC stellt auf Basis dieser Zahlen fest: »Die Streckenabschnitte ohne Tempolimit waren somit bei ›Geschwindigkeitsunfällen‹ nicht auffälliger als andere Teile des Autobahnnetzes.«

Reicht es, wenn positive Effekte plausibel sind?
Insofern herrscht vielleicht nicht unbedingt dringender Handlungsbedarf in Sachen Unfallvermeidung. Es ist damit aber nicht gesagt, dass ein Tempolimit auf Autobahnen überhaupt nichts für die Verkehrssicherheit bringen würde. Wo bereits heute die Geschwindigkeit begrenzt wird, geschieht es ja oft, weil dort das Risiko für Unglücke höher ist. Letztlich dürften durch diese Nivellierung Strecken mit und ohne Limits die Autofahrer in ähnlicher Weise stressen und zu Unfällen beitragen. Unter Umständen lassen sich dann durch ein Absenken der Geschwindigkeit auf den weniger riskanten und daher »freien« Strecken fatale Fehler am Lenkrad weiter reduzieren.

Viele internationale Studien zeigen zudem, dass langsameres Fahren grundsätzlich die Sicherheit verbessert und ein Beschleunigen des Verkehrs größere Gefahren bedeutet. Um solche Daten zu veranschaulichen, wird oft eine Studie aus Schweden mit einem griffigen Ergebnis zitiert: Ein Prozent geringeres Tempo führt zu zwei Prozent weniger Unfällen mit Verletzten, zu drei Prozent weniger Unfällen mit Schwerverletzten und zu vier Prozent weniger Unfällen mit Getöteten. Das Problem dabei: Die Untersuchung aus dem Jahr 2004 von Göran Nilsson vom Institut für Technologie in Lund, aus der die Faustformel stammt, behandelt als höchste Geschwindigkeit 112 Kilometer pro Stunde.

Eine Begrenzung der Geschwindigkeit auf deutschen Autobahnen hätte also vermutlich einige erwünschte Folgen: weniger Kohlendioxid, weniger Schadstoffe, weniger Verkehrstote. Doch die Effekte sind womöglich ziemlich klein; sie später statistisch nachzuweisen, dürfte von Details der Annahmen und Messverfahren abhängen. Das gäbe den Gegnern des Tempolimits die Chance, die Resultate grundsätzlich anzweifeln. Zumal die zu Grunde liegenden Daten teilweise viele Jahre alt sind – vor einer Entscheidung würden darum wohl neue Studien nötig.

Vor diesem Hintergrund kann man den Satz der Bundesumweltministerin Svenja Schulze (SPD) verstehen, die in einem Interview gesagt hat, der Streit um ein Tempolimit auf Autobahnen sei eine »Symboldebatte aus der Vergangenheit«. In der Politik heißt Symbol in der Regel: bringt wenig und ist sehr schwierig durchzusetzen, weil auch die jeweiligen Kontrahenten den Symbolwert erkennen und entsprechend erbitterten Widerstand leisten. Der Streit wird also weitergehen. ◂

QUELLEN

Agora Verkehrswende: Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030, 2018

Gohlisch, G., Malow, M.: Umweltauswirkungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen. Umweltbundesamt, Texte 40, 1999

Nilsson, G.: Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety. Lund University, 2004

Scholz, T. et al.: Auswirkungen eines allgemeinen Tempolimits auf Autobahnen im Land Brandenburg, Land Brandenburg, 2007

MEDIZINGESCHICHTE
AUF DEN SCHULTERN VON HIPPOKRATES UND GALEN

Indem sie Krankheit eher auf natürliche Ursachen als auf übernatürliche Kräfte zurückführte, prägte die hippokratisch-galenische Heilkunde das ärztliche Handeln bis in die Renaissance – fast zwei Jahrtausende lang.



Der Medizinhistoriker **Karl-Heinz Leven** leitet das Institut für Geschichte und Ethik der Medizin der Universität Erlangen-Nürnberg. Antike und byzantinische Medizin gehören zu seinen Forschungsschwerpunkten.

▸▸ spektrum.de/artikel/1640032

AKG IMAGES

Wer im Zusammenhang mit esoterischen oder alternativen Heilmethoden vor einem »Rückfall ins finstere Mittelalter« warnt, verkennt die Leistung und Dynamik dieser Epoche. Mochte es italienischen Gelehrten des 14. Jahrhunderts auch so vorgekommen sein, als habe sich ein düsteres »mittleres Zeitalter« zwischen eine strahlende Antike und ihre neuerlich leuchtende Gegenwart geschoben, war das Wissen der Geistesgrößen Griechenlands und Roms doch nie vollständig verschwunden. Manches wurde überliefert, in christliche Denkweisen transformiert und um neue Erfahrungen ergänzt. Das brachte niemand so treffend zum Ausdruck wie der Philosoph Bernhard von Chartres (gestorben nach 1124): »Wir sind Zwerge, auf den Schultern von Riesen sitzend, um mehr und weiter als sie sehen zu können.«

Einer dieser antiken Riesen war Hippokrates von Kos (zweite Hälfte des 5. bis erste Hälfte des 4. Jahrhundert v. Chr.), der bereits in der Antike als Erfinder der Medizin galt. Die heutzutage als »Corpus Hippocraticum« bezeichneten Schriften – ursprünglich allesamt anonym überliefert, aber bereits in der Antike unter den Namen des großen Vorbilds gestellt – deckten zahlreiche Fächer ab wie Chirurgie und Frauenheilkunde, aber auch zeittypische Themenfelder wie Prognostik und Semiotik, also die Vorhersage von Krankheitsverläufen und das Deuten von Zeichen. Im Unterschied zur modernen Prognose, die auf statistischen Daten beruht wie etwa den Fünf-Jahres-Überlebensraten bestimmter Krebserkrankungen, ging es in der hippokratischen Prognostik um die Vorhersage des individuellen Verlaufs. Einige Schriften beschäftigten sich mit den Grenzen der Heilkunst, waren also gleichsam Vorläufer einer Medizinethik. In diesen Kontext gehört auch der hippokratische Eid, der seit dem 10. Jahrhunderts zum »Corpus« gehört, in der Antike aber wohl unbekannt war.

Gegenüber einer magisch ausgerichteten Medizin bot die rationale Medizin Ärzten und Patienten einen pragmatischeren Zugang. Statt Krankheit im Kontext göttlicher oder dämonischer Mächte zu begreifen, was entsprechende magische Rituale zum Bestandteil jeder Therapie machte, betrachtete der hippokratische Arzt den Körper als einen Mikrokosmos, der mit dem Makrokosmos über physikalisch wirkende Kräfte verbunden war. Umweltfaktoren wie Klima, Winde, die Beschaffenheit von Wasser oder die Jahreszeiten konnten Krankheiten auslösen. Zwar war die individuelle Grundkonstitution (griechisch »physis«) von den Eltern ererbt, doch ließ sie sich durch die Lebensführung beeinflussen, sei es durch die Ernährung, Rhythmen von Bewegung und Ruhe, durch Schlafen und Wachen, Licht und Luft sowie anderes mehr.

Laut der hippokratischen Theorie bestand der Körper aus geformten Teilen, nämlich Knochen, Muskeln und Organen.

Hippokrates doziert, Galen als Schüler – das Fresko in der Krypta der Kathedrale von Anagni (13. Jahrhundert) stellt die beiden großen Ärzte als »Kollegen« dar. In dieser Zeit waren im lateinischen Westen bereits größere Teile der Werke der hippokratisch-galenischen Medizin wieder verfügbar geworden.

AUF EINEN BLICK
AUSGLEICH DER KÖRPERSÄFTE

1 Das Klima oder eine ungünstige Lebensführung – Hippokrates hielt natürliche Ursachen für Krankheitsauslöser. Religiöse Vorstellungen waren für seine »rationale« Medizin von untergeordneter Bedeutung.

2 Eine wesentliche Rolle spielten für antike Ärzte die »Körpersäfte«: Blut, Schleim, gelbe und schwarze Galle. Deren Gleichgewicht sei bei Kranken gestört und therapeutisch wiederherzustellen.

3 Mehr als 500 Jahre nach Hippokrates erweiterte und systematisierte Galen dieses Schema um die Qualitäten »warm-kalt« und »trocken-feucht«. Daraus leiteten Ärzte noch in der Neuzeit Ernährungsempfehlungen, Medikamente und sonstige Maßnahmen ab.

Da man Leichen nicht sezierte, konnte man über die Formen und Funktionen von Organen in Gesundheit und Krankheit oft nur spekulieren. Aus den Beobachtungen kannte man aber die Körperflüssigkeiten. So entstand die Vorstellung von vier Säften als dynamischen Komponenten des Gesamtkonzepts: Blut, Schleim, gelbe und schwarze Galle.

Die hippokratische Medizin war im buchstäblichen Sinne klinisch orientiert; sie wirkte am Krankenbett (griechisch »kline«). Dort wurden auch angehende Ärzte von ihren Lehrern unterwiesen. Diese konnten bezahlt sein – oder ein Vater, der sein Wissen dem Sohn weitergab. Ausbildungsstätten wie Schulen oder Akademien gab es in der Antike zu keiner Zeit. Auch in Alexandria, seit dem Hellenismus ein Zentrum aller Wissenschaften, blieben persönliche Lehrer-Schüler-Verhältnisse die Regel.

Richtige Prognosen machten den guten Arzt

Die Diätetik, also die Kunst der Lebensführung, bildete die erste Stufe der Behandlung, Heilmittel (griechisch »pharmaka«) aus dem Pflanzen-, Tier- und Mineralreich die zweite. Hier gab es eine beachtliche Vielfalt, und vermutlich enthielten etliche davon tatsächlich auch aus naturwissenschaftlicher Sicht geeignete Wirkstoffe. Allerdings lassen sich verwendete Substanzen anhand der antiken Namen und Beschreibungen oft nicht identifizieren, zudem ist ihre Konzentration in den alten Rezepturen kaum abzuschätzen.

Eine dritte Sparte der Medizin bildete die Chirurgie, die sich auf das Versorgen von Wunden und Knochenbrüchen sowie auf kleinere Eingriffe wie das Aufschneiden von Abszessen oder Hämorriden beschränkte. Die Ärzte waren sich der Grenzen ihrer Kunst bewusst und machten aus dieser Not eine Tugend, indem sie die bereits erwähnte »Prognostik« als wesentliche Leistung ihres Berufs verstanden: Aus den Symptomen Verlauf und Ausgang eines Krankheitsfalls richtig vorherzusagen, machte den fähigen Arzt aus – selbst wenn er seinem Patienten den Tod prognostizierte.

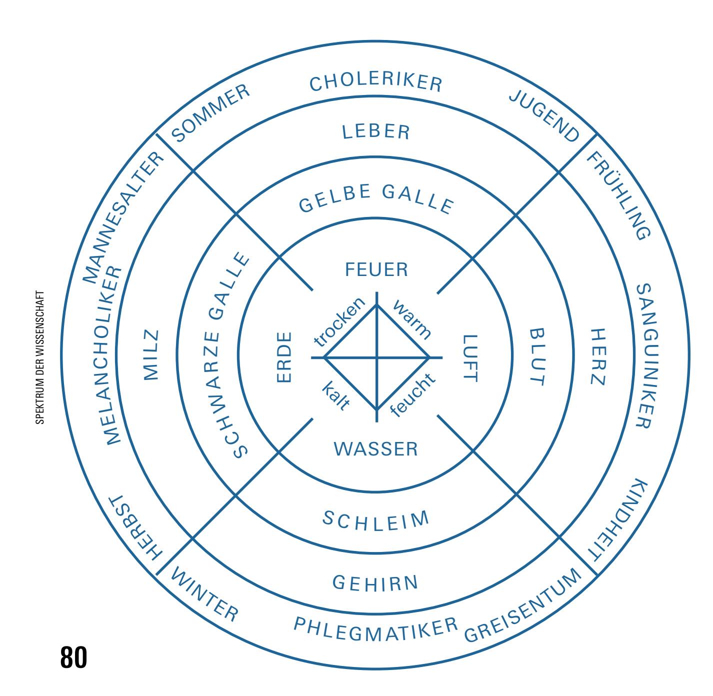
Unser Wissen verdanken wir der sorgfältigen Arbeit von Kopisten über Jahrhunderte hinweg. Denn als Träger allen gelehrten Schrifttums im antiken Mittelmeerraum dienten Rollen von Papyrus. Diese hielten sich bei schonender Benutzung maximal 300 Jahre. Dank des trockenen Klimas in Ägypten haben sich dort einige Papyri komplett, andere als Fetzen erhalten. Die meisten solcher Schriften kennen wir aber aus Kopien auf Pergament: In der Spätantike kam dieser Beschreibstoff aus Leder auf, was eine Anordnung von Blättern zu Büchern erlaubte. Solche »Kodizes« sind unter günstigen Bedingungen nahezu unbegrenzt haltbar. Unsere Kenntnis der griechischen Literatur allgemein und der Medizin im Besonderen basiert auf byzantinischen Kodizes, die etwa seit dem 10. Jahrhundert entstanden.

Hippokratische Schriften verbreiteten sich im Zuge der Eroberung des persischen Großreichs durch Alexander den Großen im 4. Jahrhundert v. Chr. in alle Provinzen. Das von diesem begründete Alexandria entwickelte sich zu einem Zentrum gelehrter Medizin. Dort wurden gut 60 dem Hippokrates zugeschriebene Texte – der Name bürgte für Tradition und Autorität – gesammelt und kommentiert. Man betrieb aber auch eigene Forschung. Insbesondere Anatomie und Physiologie schritten um 300 v. Chr. voran, wurden doch erstmals Leichname seziert. Für kurze Zeit war es sogar erlaubt, zum Tode Verurteilte bei lebendigem Leib aufzuschneiden. Diese grausame Praxis wurde schon damals scharf kritisiert, gleichwohl hat man die gewonnenen Informationen bis in die frühe Neuzeit genutzt.

Die größten Neuerungen brachte der aus Pergamon stammende Galen (129–210/216 n. Chr.). Aus wohlhabendem Haus stammend, studierte er in Alexandria und an anderen Orten. Von seinen Vivisektionen an Tieren, die ihm eine umfassende Kenntnis von Anatomie und auch Physiologie verschafften, profitierten vor allem die Gladiatoren in Pergamon, die er chirurgisch betreute. Zur Zeit Kaiser Marc Aurels (regierte 161–180) wirkte Galen in Rom. Die Medizin war auch in der Hauptstadt des Imperiums eine griechische Kunst, ausgeübt von ausgewanderten oder als Sklaven verschleppten Griechen. Zu Galens Patienten gehörten Angehörige der Elite, sein Ruf und spektakuläre Erfolge verschafften ihm Zugang zum Kaiserpalast. Insbesondere die Prognostik beherrschte er derart meisterlich, dass ihn manche Zeitgenossen einen Seher nannten, was Galen als vergiftetes Lob von Neidern und Rivalen betrachtete.

Trotz innovativer Forschungen berief er sich stets auf Hippokrates und datierte Erkenntnisse hellenistischer Ärzte zurück in dessen Zeit. Auf diese Weise inszenierte er sich gleichsam als lebenden Stellvertreter des großen Vorbilds. Wenn heutige Forscher die antike Medizin in ihrer Gesamtheit als hippokratisch-galenisch bezeichnen, entspricht das genau Galens Absicht: Für ihn war die ideale Medizin diejenige des Hippokrates – in der von Galen gestalteten und in mehreren hundert Schriften niedergelegten Weise.

Elemente, Qualitäten, Säfte: Das auf Hippokrates und Galen zurückgehende Schema ordnete die Welt und ermöglichte Bezüge zu Körper, Charaktertyp und Alter.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein Arzt für (fast) alle Fälle

Einen großen Teil dieser Werke kennen wir dank der emsigen Arbeit byzantinischer, arabischer und auch europäischer Kopisten. Offenbar äußerte sich Galen zu fast allen Fachbereichen der antiken Medizin. In seiner Diagnostik entwickelte er ein spezielles Interesse für den Pulsverlauf und die Harnschau. Galen schwieg lediglich zu Frauenheilkunde und Geburtshilfe, vielleicht weil diese bereits im 2. Jahrhundert n. Chr. durch Soran von Ephesos mustergültig abgehandelt worden waren.

Um Gesundheit und Krankheit systematischer zu fassen, erweiterte Galen die Lehre von den vier Körpersäften um die von Aristoteles postulierten antagonistischen Qualitäten der vier Elemente Erde, Luft, Feuer und Wasser: warm-kalt und trocken-feucht. So sei gelbe Galle warm und trocken wie das Feuer, der Schleim hingegen so kalt und feucht wie Wasser (siehe Bild links). Mag diese so genannte Humoralpathologie (lateinisch »humor« für Saft) aus Sicht der naturwissenschaftlichen Medizin wenig mit der Wirklichkeit gemein haben, war sie gleichwohl ein großer Wurf. Denn Galen schuf damit einen Universalschlüssel für nahezu alle medizinischen Phänomene bis hin zur Medikamentenwirkung.

Wie Hippokrates war Galen kein Atheist, er glaubte an ein göttliches Prinzip als Schöpfer der Welt. Gleichwohl hielt er das Übernatürliche für nicht relevant in der Physiologie und Pathologie körperlicher Vorgänge. Er war ein Vertreter »rationaler«, das heißt vernunftbasierter Medizin: Alle Diagnosen und Therapien sollten aus dem Wissensfundus abgeleitet und vernünftig durchdacht sein. Allerdings bezeichnete sich Galen als Verehrer des griechischen Heilgotts Asklepios und akzeptierte dessen Kult und die in den Tempeln praktizierte Medizin. Trotzdem wunderte er sich, wenn Patienten den teils rabiaten Vorschriften, die ihnen die Gottheit in Träumen offenbarte, oft eher folgten als ärztlichen Anweisungen.

Im Wesentlichen aber übten Hippokrates und Galen Zurückhaltung in religiösen Belangen, was die Übernahme ihrer Heilkunde durch christliche Ärzte erleichterte und



SHEILA TERRY / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Asklepios galt in der griechischen Antike als Heilgott, der sich Träumenden offenbarte. Auch Galen gehörte zu seinen Anhängern. Dennoch klammerte er die Religion aus seinen Diagnosen und Therapien aus.

damit den Fortbestand ihres Wissens sicherte, als das Christentum am Ende des 4. Jahrhunderts zur Staatsreligion avancierte und heidnische Kulte verboten wurden. Als das Imperium zerbrach, entwickelte sich im griechischen Osten (Byzanz) eine eigentümliche Mischung aus römischem Staatsgedanken, griechischer Kultur und christlicher Religion. Dort blieb das hippokratisch-galenische Gedankengut lebendig, es wurde in Sammlungen zusammengetragen, kommentiert und ergänzt. Im lateinischen Westen hingegen nahm das Vermögen, Griechisch zu lesen, rapide ab. Die meisten medizinischen Texte, auch die Galens, waren zu der Zeit noch nicht übersetzt worden.

In dieser Hälfte des Imperiums bestimmte die so genannte Völkerwanderung die weitere Dynamik. Das alte Rom mit seinen Provinzen wich einer Vielzahl von Reichen mit germanischen Regenten. Der Untergang Roms erfolgte nicht an einem bestimmten Tag, aber das Ergebnis der Völkerwanderung war eine neue Welt. Fortgesetzte Kriegszüge und Plünderungen schädigten die römische Stadtkultur nachhaltig. Die sich im 6. Jahrhundert von Byzanz aus in den Westen verbreitende Pest, die ganze Landstriche entvölkerte, tat das ihre: Kulturellen Leistungen und Traditionen fehlte die materielle Basis, zum Beispiel ging die Produktion von Literatur dramatisch zurück. Im lateinischen Westen boten Klöster mit ihren Skriptorien und Bibliotheken jahrhundertelang Rückzugsorte, an denen antike Texte gesammelt und abgeschrieben wurden. Man wusste zwar vage von der Bedeutung Hippokrates' und Galens, aber deren Texte waren in Europa nur noch in Bruchstücken bekannt.

Die verschlungenen Wege der Überlieferung

Der byzantinische Osten kam zunächst glimpflicher davon. Im 7. Jahrhundert aber verlor Byzanz einen Großteil seiner südlichen Provinzen an die islamischen Eroberer. Auch die Donaugrenze ließ sich nicht länger gegen andringende slawische Stämme halten; Konstantinopel und Thessaloniki verblieben jedoch stets in byzantinischer Hand. Historiker bezeichnen die Zeit von etwa 65 bis 850 als dunkle Jahrhunderte, denn sie war von kultureller Verarmung geprägt. Freilich blieb Griechisch die Verkehrssprache, hippokratisch-galenische Texte waren weiterhin lesbar.

Das kulturelle Schaffen hatte sich verlagert: Ab dem späten 8. Jahrhundert leisteten arabische Christen in Bagdad, der neu gegründeten Hauptstadt des abbasidischen Kalifats, einen Kulturtransfer, der in der Weltgeschichte kaum seinesgleichen hat. Sie übersetzten nahezu die gesamte griechische Fachliteratur für die neue islamische Oberschicht und deren christliche Hofärzte ins Arabische. Der Orient verfügte im 9. Jahrhundert über eine Textbasis, die im lateinischen Abendland in diesem Umfang erst in der Renaissance wieder erreicht werden sollte. Immerhin bestückten einige aus dem Arabischen ins Lateinische übertragene antike Schriften im 11. und 12. Jahrhundert die Büchereien der jungen Medizinschulen und Universitäten in Europa.

Die hippokratisch-galenische Medizin bewies in allen diesen Transformationsprozessen eine beachtliche Vitalität. Der Untergang Konstantinopels 1453, der letzten Hochburg byzantinischer Gelehrsamkeit, bescherte ihr sogar eine »Renaissance«: Italienische Humanisten kauften vor und nach der Eroberung antike griechische Schriften auf. In der intensiven und kritischen Auseinandersetzung mit Hippokrates und Galen stießen sie in neue Gebiete vor und legten die Grundlagen unserer modernen Medizin. ◂

QUELLEN

Jankrift, K. P.: Krankheit und Heilkunde im Mittelalter. WBG, 2012

Leven, K.-H.: Geschichte der Medizin. Von der Antike bis zur Gegenwart. C.H.Beck, 2019

Leven, K.-H.: Antike Medizin. Ein Lexikon. C.H.Beck, 2005

Mehr zum Thema lesen Sie im nächsten Heft:
»Klostermedizin – von Monte Cassino nach Bingen«



RUSLAN GILMANSHIN / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SERIE

Was ist der Mensch?

Teil 1: Januar 2019
Ein einzigartiges Wesen
Kevin Laland

Schlaue Köpfe
Thomas Suddendorf

Teil 2: Februar 2019
Das schwierigste Problem
Susan Blackmore

Teil 3: März 2019
Der Rede wert
Christine Kenneally

Teil 4: April 2019
Die Letzte ihrer Gattung
Kate Wong

Unterschiedlich verdrahtet
Chet C. Sherwood

Teil 5: Mai 2019
Die Geburt des »Wir«
Michael Tomasello

Teil 6: Juni 2019
Warum wir kämpfen
R. Brian Ferguson

KULTURANTHROPOLOGIE

WARUM WIR KÄMPFEN

Liegt den Menschen die Kampflust im Blut? Oder resultiert sie aus unserer kulturellen Entwicklung? Über diese Frage sind sich Wissenschaftler keineswegs einig. Archäologische Funde und ethnografische Berichte zeigen aber: Auf militärische Konflikte programmiert sind wir offenbar nicht.



R. Brian Ferguson ist Professor für Anthropologie an der Rutgers University in Newark (USA). Seine Forschungen widmet er der Frage nach den Ursprüngen der Kriegsführung.

spektrum.de/artikel/1640034

Neigen Menschen – oder vielleicht auch nur Männer – von Natur aus dazu, andere zu töten? Besitzen sie sogar eine angeborene Neigung zu kollektiver Gewalt? Der Schlüssel liegt in dem Wort »kollektiv«. Menschen kämpfen und morden aus persönlichen Gründen, aber Mord ist nicht gleich Krieg. Kriege sind etwas Gemeinschaftliches: Gruppen organisieren sich, um Mitglieder anderer Gruppen umzubringen.

Die Kontroversen über die Wurzeln der Kriegsführung drehen sich um zwei gegensätzliche Positionen, deren jeweilige Verfechter der Anthropologe Keith Otterbein (1936–2015) als »Falken« und »Tauben« bezeichnete. Den Ersteren zufolge neigen wir instinktiv dazu, zu den Waffen zu greifen, um potenzielle Konkurrenten auszuschalten. Demnach hätten Menschen bis zurück zu unserem letzten gemeinsamen Vorfahren mit den Schimpansen schon immer Kriege geführt. Die friedfertigen »Tauben« hingegen meinen, bewaffnete Konflikte hätten sich erst in den letzten Jahrtausenden entwickelt, als sich die Gesellschaften änderten und die Motivation und Organisation für das gemeinschaftliche Töten lieferten. Die Debatte berührt damit auch die Frage, ob Schimpansen ebenfalls einen Kriegsinstinkt besitzen (siehe »Kriegerische Schimpansen?«, S. 86).

Falls Krieg zu führen dem Menschen tatsächlich angeboren ist, sollten wir dafür archäologische Spuren finden. Die »Falken« behaupten, solche Anhaltspunkte gebe es. »Sobald sich Gesellschaften archäologisch gut fassen lassen, gehören dazu fast immer Hinweise auf Krieg«, schrieben die Archäologen Steven LeBlanc und Katherine Register 2003. »Vorsichtig geschätzt ergibt sich ein Anteil von 25 Prozent kriegsbedingter Todesfälle.« Eine solch hohe Opferrate spräche Evolutionspsychologen zufolge dafür, dass Krieg als eine Art natürlicher Selektionsmechanismus diente, bei dem sich die Besten den Zugang zu wichtigen Ressourcen erkämpften und sich fortpflanzten.

Diese kulturdarwinistische Sichtweise hatte großen Einfluss auf die Wissenschaft. So ist der Politologe Francis Fukuyama der Ansicht, die Wurzeln von Krieg und Völkermord reichten Zehntausende oder sogar Hunderttausende von Jahren zurück bis zu unseren jagenden und sammelnden Urahnen, ja sogar bis zu unseren gemeinsamen Vorfahren mit den Schimpansen. Und für seinen Kollegen Bradley Thayer erklärt die Evolutionstheorie, warum die Menschen aus dem natürlichen Drang heraus, ihre eigene Sippe zu beschützen, immer fremdenfeindlicher und ethnozentrischer wurden. Wenn es schlichtweg in der menschlichen Natur liegt, Fremde kollektiv umzubringen, können wir es dann überhaupt verhindern?

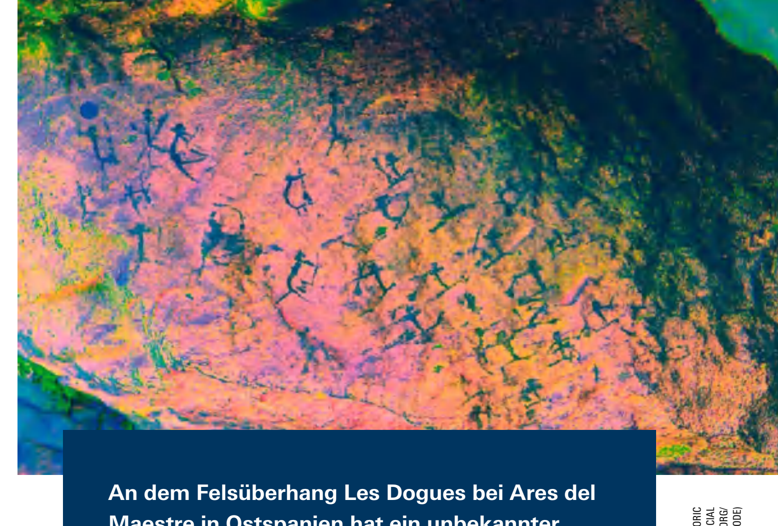
Die Anthropologen und Wissenschaftler im Lager der »Tauben« stellen solche Ansichten in Frage. Menschen, so ihre Argumentation, haben offensichtlich die Neigung, Kriege zu führen, aber ihr Gehirn ist keineswegs darauf programmiert. Vielmehr hätten sie sich erst dann zu Angriffen zusammengeschlossen, als die Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften größer und komplexer und unsere Vorfahren später durch die Erfindung der Landwirtschaft sesshaft wurden. Diese Theorie stützen die Forscher auf archäologische Funde sowie ethnografische Berichte, die Rückschlüsse auf die Anfänge und Gründe von Kriegen erlauben.

Den Archäologen stehen hierfür vier Typen von Belegen zu Verfügung. Als Beweis Nummer 1 gelten altsteinzeitliche Felsmalereien. So haben unsere Vorfahren in den französischen Höhlen Cougnac, Pech Merle und Cosquer bereits vor etwa 25 000 Jahren Menschen gezeichnet, die anscheinend mit Speeren durchbohrt waren. Einige Forscher deuten das als Hinweis darauf, dass es bereits während der jüngeren Altsteinzeit zu kriegerischen Auseinandersetzungen gekommen ist. Diese Interpretation ist allerdings umstritten. Andere Wissenschaftler erkennen bei den unvollständigeren Gestalten der Gemälde Schwänze, weshalb es sich eher um Schamanen handle. Sie halten die gebogenen oder wellenförmigen Linien, die sich mit den Figuren überschneiden, daher nicht für Speere, sondern für Darstellungen magischer Kräfte.

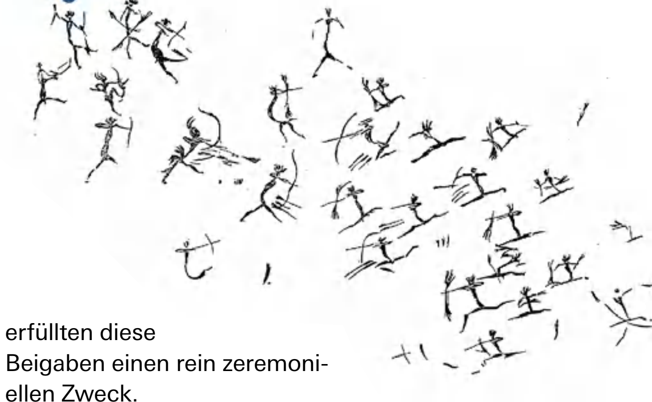
Deutlicher erscheinen da die Zeichnungen an einem Felsüberhang bei Ares del Maestre im Osten Spaniens. Sie zeigen eindeutig Kämpfe und Hinrichtungen, wurden aber vermutlich von sesshaften Bauern erst viele Jahrtausende später gestaltet (siehe Bild oben).

Waffen als Symbole der Macht

Als Beweis Nummer 2 gelten Waffen. Diese sind allerdings schwieriger zu erkennen, als man vielleicht vermutet. Früher hielt ich zum Beispiel Keulen eindeutig für Kriegsinstrumente, bis ich erfuhr, dass sich die meisten jungsteinzeitlichen Exemplare aus dem Nahen Osten wohl kaum zum Kämpfen eigneten. Ihre Schäftungslöcher sind so klein, dass die darin steckenden Griffe vermutlich beim ersten Hieb zerbrochen wären. Solche Keulen dienten vermutlich eher als Machtsymbol. Ein Anführer mit einem derartigen Zepter war vielleicht mächtig genug, um Konflikte auch ohne kriegerische Gewalt lösen zu können. Geschosse aus Stein oder Knochen, die Archäologen in Gräbern finden, dienten ebenfalls nicht immer dem Töten. Oft



An dem Felsüberhang Les Dogues bei Ares del Maestre in Ostspanien hat ein unbekannter Künstler vor mehr als 5000 Jahren eine kriegerische Auseinandersetzung verewigt.



erfüllten diese Beigaben einen rein zeremoniellen Zweck.

Andererseits können vermeintlich harmlose Geräte zu tödlichen Waffen werden. So wurden vor rund 7000 Jahren im baden-württembergischen Talheim und im rheinland-pfälzischen Herxheim etliche Menschen niedergemetzelt und in Massengräbern verscharrt. Unter anderem schlugen die Angreifer mit Dechseln auf ihre Opfer ein – das sind Werkzeuge, mit denen man üblicherweise Holz bearbeitet.

Neben Kunstwerken und Waffen finden Archäologen auch in den Siedlungen Hinweise auf kriegerische Konflikte: Beweis Nummer 3. Menschen, die fürchten müssen, angegriffen zu werden, treffen in der Regel Vorsichtsmaßnahmen. Im jungsteinzeitlichen Europa beispielsweise gaben die Bauern ihre offenen Siedlungen mit weit verstreuten Gehöften auf und gründeten enger bebaute Dörfer, die sich besser verteidigen ließen. Sie errichteten sogar Wallanlagen, die aber nicht unbedingt ihrem Schutz dienten. Manche sollten vielleicht nur verschiedene soziale Gruppen voneinander abgrenzen.

Beweis Nummer 4 sind schließlich Skelettreste. Sie müssen jedoch sorgfältig untersucht werden. So hinterlässt lediglich jede dritte oder vierte Schusswunde Spuren an Knochen. Nicht verheilte Wunden, die vereinzelt an Toten festgestellt werden, könnten die Folgen eines Unfalls, einer Hinrichtung oder eines gewaltsamen Todes sein. Tatsächlich scheint in prähistorischen Gesellschaften recht häufig gemordet worden zu sein – doch das ist kein Krieg. Und nicht alle Kämpfe endeten tödlich. Sehr häufig fanden

Archäologen Spuren verheilter Schädelbrüche, die offenbar von Knüppeln oder anderen stumpfen Gegenständen herrührten, mit denen vielleicht persönliche Meinungsverschiedenheiten ausgetragen wurden. Aus der Ethnografie kennen wir viele Beispiele solcher »Konfliktlösungen«. Stammen solche Schädel vor allem von Frauen, so deutet dies auf häusliche Gewalt hin.

Archäologische Funde sind also nicht eindeutig. Häufig muss man verschiedenen Anhaltspunkten nachgehen, um kriegerische Konflikte aus ferner Vergangenheit aufzuspüren. Wichtig dabei sind sorgfältige Ausgrabungen.

Unterm Strich bleibt somit die Frage: Welche Hinweise gibt es tatsächlich, dass Menschen seit jeher Kriege geführt haben? Wählt man als Stichprobe vor allem Skelette mit Verletzungen, die um den Todeszeitpunkt herum zugefügt wurden, kann das zu falschen Schlüssen führen. Auf diese Weise kam es etwa zu der eingangs erwähnten Schätzung von 25 Prozent gewaltsamer Todesfälle. Dass die Presse sich auf solche Forschungsergebnisse stürzt, verzerrt das Bild, das wir von unseren Vorfahren haben, noch zusätzlich. Jede Entdeckung eines prähistorischen Totschlags gelangt in die Schlagzeilen. Die unzähligen Ausgrabungen, die keinerlei Anzeichen für Gewalt liefern, schaffen es hingegen nur selten in die Nachrichten. Durchforstet man aber eine Region nach archäologischen Hinweisen auf Kriege, relativiert sich die Sicht: Krieg gab es weder überall noch reichen seine Spuren unendlich weit in die Vergangenheit zurück. Irgendwann im Lauf ihrer Geschichte müssen Menschen also damit begonnen haben.

Viele Archäologen meinen, das sei nach dem Ende der letzten Eiszeit geschehen, als sich vor etwa 12 000 Jahren in der mittleren Steinzeit, dem Mesolithikum, eine neue Lebensweise durchsetzte. Die Jäger und Sammler Europas wurden langsam sesshaft und bildeten komplexere Gemeinschaften. Doch nicht überall führte das zu zunehmender kollektiver Gewalt. Vielmehr scheint Krieg an unterschiedlichen Orten zu verschiedenen Zeiten entstanden zu sein. Die Funde von Jebel Sahaba, einem Fundort am östlichen Nilufer im Sudan, gelten als ältester Nachweis für einen kriegerischen Konflikt. Dort sollen rivalisierende Jäger-und-Sammler-Gruppen bereits vor 14 000 Jahren erbitterte Kämpfe um schwindende Nahrungsquellen geführt haben.

Am nördlichen Tigris in Mesopotamien bekriegten sich sesshafte Dorfgemeinschaften wohl erstmals zwischen 9750 bis 8750 v. Chr., wie Siedlungsweise, Waffen und Bestattungen nahelegen. Im 7. Jahrtausend v. Chr. entstanden hier die ersten Befestigungsanlagen und im 5. und 4. Jahrtausend die ersten Städte. Zu jener Zeit brachen von dort Menschen auf, um Gebiete im nördlich gelegenen Anatolien zu erobern, womit sie vermutlich überall in dieser Region Kriege auslösten.

Währenddessen scheint es in der südlichen Levante, also vom Sinai bis zum südlichen Libanon und Syrien, hingegen sehr friedlich zugegangen zu sein. Vor 3200 v. Chr. gibt es hier keine überzeugenden archäologischen Hinweise auf kriegerische Konflikte.

In Japan blieben gewaltsame Tode bei Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften sogar bis 800 v. Chr. eher die Ausnahme. Erst mit Beginn des Nassreisanbaus um 300 v. Chr. kamen dort wohl mehr Menschen – mindestens jeder zehnte – gewaltsam ums Leben. Und in Nordamerika scheinen Verletzungsspuren an manchen sehr alten Skelettfunden ebenfalls weniger für kollektive, sondern eher für persönliche Auseinandersetzungen zu sprechen. So an einem Fundort in Florida, wo es um 5400 v. Chr. zu mehreren Tötungen kam, ebenso um 2200 v. Chr. an der nordamerikanischen Pazifikküste. Aus dem Gebiet der südlichen Great Plains gibt es für die Zeit vor 500 n. Chr. bisher sogar nur einen einzigen bekannten Nachweis für einen gewaltsamen Todesfall.

Wenn Menschen etwas besitzen, wappnen sie sich gegen Krieg

All diese Beispiele legen nahe, dass bestimmte Voraussetzungen einen Krieg wahrscheinlich machen: der Übergang zu einer sesshaften Lebensweise, eine größere Bevölkerungsdichte, die Konzentration wertvoller Ressourcen wie Vieh, eine wachsende gesellschaftliche Komplexität und Hierarchien, der Handel mit Luxusgütern sowie die Herausbildung kollektiver Identitäten und damit die stärkere Abgrenzung sozialer Gruppen voneinander. Solche Entwicklungen gehen oft einher mit gravierenden Umweltveränderungen.

Auch den Krieg in Jebel Sahaba könnte eine ökologische Krise ausgelöst haben: Nachdem eine verheerende Nilflut das fruchtbare Sumpfland zerstört hatte, waren die Menschen vermutlich dazu gezwungen, die Region zu verlassen und sich neue Lebensräume zu erkämpfen. Später, Jahrhunderte nach der Erfindung der Landwirtschaft, kam es im jungsteinzeitlichen Europa ebenfalls verstärkt zu kriegerischen Auseinandersetzungen: Wenn Menschen mehr besitzen, worum es sich zu kämpfen lohnt, organisieren sie ihre Gesellschaften so, dass sie gegen Kriege besser gewappnet sind.

Weitere Anhaltspunkte für die Voraussetzungen von Kriegen finden sich in der Ethnografie, also der Erforschung heutiger und vergangener Kulturen. Hier wird grundlegend

AUF EINEN BLICK
ZU DEN WAFFEN!

1. Krieg gehört zur Geschichte des Menschen. Umstritten ist, ob dieses Gewaltpotenzial schon immer zu seinem Wesen zählte oder erst später entstand.

2. Manche Wissenschaftler argumentieren, die gesamte Evolution der Menschen sei von Kriegen begleitet gewesen. Demnach hätten sich daraus auch Fremdenfeindlichkeit und Ethnozentrismus entwickelt.

3. Ein genauer Blick auf archäologische und ethnografische Quellen offenbart jedoch: Kollektives Töten ist eine Folge kultureller Veränderungen, die vor etwa 12 000 Jahren ihren Anfang nahmen.

zwischen »einfachen« und »komplexen« Gemeinschaften von Jägern und Sammlern unterschieden.

Während des Großteils seiner etwa 200 000-jährigen Geschichte lebte *Homo sapiens* in einfachen Wildbeutergemeinschaften. Die Menschen schlossen sich zu kleinen Gruppen zusammen, die im Allgemeinen egalitär organisiert waren. Auf der Suche nach Nahrung mussten sie weite Gebiete durchstreifen und vermutlich mit anderen Sippen kooperieren.

In komplexeren Jäger-und-Sammler-Gesellschaften lebten die Menschen bereits in festen Siedlungen, deren Bevölkerung in die Hunderte ging. Eine soziale Rangfolge, die auf verwandtschaftlichen Beziehungen von Gruppen und Einzelpersonen beruhte, bestimmte den Zugang zu Nahrungsressourcen, es entwickelte sich eine politische Führung. Anzeichen hierfür finden sich erstmals in der Mittelsteinzeit, als sich mancherorts bereits die landwirtschaftliche Lebensweise durchsetzte – die Grundlage für die Entstehung späterer Staaten. Solche Gemeinschaften führten auch häufiger Krieg gegeneinander.

Doch nur weil die Voraussetzungen für Krieg in einer Gesellschaft existieren, heißt das noch nicht, dass er ausbrechen muss. Die südliche Levante etwa erfüllte all diese Bedingungen jahrtausendelang, dennoch fehlen für lange Zeit archäologische Hinweise auf kriegerische Konflikte. Es gibt wohl ebenso typische Voraussetzungen für Frieden. Dazu zählen Vereinbarungen und Verträge, die zwischen verschiedenen Gruppen beispielsweise durch gezielte Heiratspolitik geschlossen werden, Gewalt verachtende Normen, Kooperationen bei der Jagd, der Ernte oder dem Teilen von Nahrung, soziale Durchlässigkeit und schließlich Institutionen, die sich um Konfliktlösungen bemühen. Solche gesellschaftlichen Mechanismen können Feindseligkeiten zwar nicht immer abwenden, sie aber zumindest kanalisieren und damit das Töten entweder verhindern oder auf relativ wenige Menschen beschränken.

Wenn Gesellschaften also auch solche friedenssichernden Instrumentarien entwickeln, warum häufen sich dann im Lauf der Geschichte die Spuren kriegerischer Gewalt? Weltweit entwickelten sich Staaten, die Völker an ihren

Kriegerische Schimpansen?

Beschäftigt man sich mit der Frage, ob Menschen einen Kriegsinstinkt besitzen, betrachtet man häufig Schimpansen. Selbst wenn Gruppenkonflikte zwischen den Tieren oft als Kriege bezeichnet werden, fehlen ihnen die gesellschaftlichen und kognitiven Dimensionen, die charakteristisch für die menschliche Kriegsführung sind. Beim Menschen besitzen die Gegner unterschiedliche politische Organisationsformen, deren Wissens- und Wertesysteme ein machtvolles Gefühl des »Wir gegen sie« erzeugen. Solche kulturspezifischen Konstrukte gibt es bei anderen Primaten nicht. Trotzdem glauben einige Wissenschaftler, bei Schimpansen eine angeborene Neigung zum Töten Fremder erkennen zu können, die sie vom letzten gemeinsamen Vorfahren mit dem Menschen geerbt hätten – und die demnach an uns weitergegeben worden sein könnte.

Meine langjährigen Forschungen zu diesem Thema, bei denen ich alle Berichte über tötende Schimpansen durchforstet habe, stellen diese These allerdings in Frage: Eine kritische Prüfung von 18 Forschungsstätten – die aufsummiert 426 Jahre Freilandbeobachtung repräsentieren – lieferte 27 Tötungsfälle zwischen verschiedenen Schimpansenpopulationen. Davon traten 15 in nur zwei Kampfsituationen zwischen 1974 und 1977 sowie zwischen 2002 und 2006 an zwei verschiedenen Orten auf. Damit ergibt sich, dass innerhalb dieser neun Beobachtungsjahre im Schnitt 1,67 Schimpansen pro Jahr gewaltsam ums Leben kamen. Die restlichen 417 Beobachtungsjahre bringen es jährlich auf durchschnittlich 0,03 getötete Tiere.

Einige Evolutionsbiologen vermuten, dass die Tötungen die Zahl der Männchen im besten Kampfesalter in rivalisierenden Gruppen dezimierten. Doch aus denselben Daten ergibt sich etwas anderes: Zieht man die Zahl der zur Gruppe gehörenden Männchen von der Summe aller Opfer ab, so wurde nur alle 27 Jahre ein außenstehendes Männchen getötet – das übersteigt die Lebenserwartung eines Schimpansen.

Damit stellt sich die Frage, ob Gewalt unter Schimpansen eine evolutionsbedingte Verhaltensanpassung darstellt oder nicht eher durch menschliche Eingriffe in die Lebenswelt der Schimpansen ausgelöst wird. Ich halte Letzteres für am plausibelsten. Die Kriegslust des Menschen beruht damit wohl kaum auf dem genetischen Erbe eines entfernten gemeinsamen Vorfahren von uns und den Schimpansen.


Selbst die als friedliebend geltenden Zwergschimpansen fallen mitunter übereinander her.

USO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Grenzen und entlang ihrer Handelswege an die Waffen zwangen. Einmal etabliert, breitete sich Krieg immer mehr aus, wobei gewalttätige Völker die weniger gewalttätigen nach und nach ersetzten. Umweltveränderungen wie häufige Dürren verschärften die Bedingungen oder verursachten überhaupt erst Kriege; und selbst wenn sich die Umstände wieder verbesserten, kehrte der Frieden nicht unbedingt zurück.

Beispiele für solche klimatischen Ursachen sind die so genannte mittelalterliche Warmzeit zwischen etwa 950 und 1250 und die darauf folgende Kleine Eiszeit ab etwa 1300. In diesem Zeitraum kam es in Amerika, im Pazifikraum und anderswo vermehrt zu Kriegen. In den meisten anderen Regionen stieg die Zahl der Konflikte ebenfalls und damit die der Kriegsopfer.

Später veränderte die Kolonialzeit die politische Weltordnung sowie die Art der Kriegsführung und schuf neue Konflikte, bei denen sich keineswegs immer nur Eroberer und Unterdrückte gegenüberstanden. Auch die indigenen Völker begannen untereinander Krieg zu führen, weil sie durch die Konquistadoren und deren Handelswaren in Abhängigkeiten und neue Feindseligkeiten verwickelt wurden.

Diese Konflikte förderten die Entwicklung ausgeprägter Stammesidentitäten und -abgrenzungen. Selbst Gebiete, die außerhalb der kolonialen Einflüsse lagen, veränderten sich durch globalen Handel, eingeschleppte Krankheiten und Migrationen, die wiederum zu Kriegen führten. Außerdem schürten die Kolonisatoren Konflikte zwischen den indigenen Völkern, indem sie ihnen politische Institutionen aufzwangen sowie willkürlich, ohne Rücksicht auf die vielfältigen lokalen Stammesidentitäten und ihre Autoritäten, territoriale Grenzen zogen.

Mündliche Überlieferungen lassen sich kaum in die ferne Vergangenheit projizieren

Einige Wissenschaftler, die Kriegsführung als Teil der menschlichen Natur betrachten, suchen oft in Feindseligkeiten und brutalen Auseinandersetzungen zwischen traditionellen Stammesgesellschaften nach Hinweisen, um ihre Theorie zu untermauern. Eine genaue historische Untersuchung der ethnografischen Quellen über solche Gewaltausbrüche wirft aber oft ein anderes Licht auf den vermeintlichen Tatbestand.

Jäger-und-Sammler-Gruppen, die vom späten 18. bis ins 19. Jahrhundert im nordwestlichen Alaska lebten, zeigen, wie falsch es sein kann, mündliche Überlieferungen als wahre Vergangenheit zu interpretieren. In den Erzählungen kursieren Geschichten über heftige Kriege und Massaker, was als Beleg dafür diente, dass diese Walfänger-Gemeinschaften bereits vor ihrem Kontakt mit den expandierenden industrialisierten Staaten in kriegerische Handlungen verwickelt gewesen seien. Doch die archäologischen Funde liefern keinerlei Hinweise auf solche Konflikte, ebenso wenig die historischen Aufzeichnungen. Erste Anzeichen kollektiver Feindseligkeiten finden sich für die Zeit zwischen 400 und 700, vermutlich ausgelöst durch Einwanderer aus Asien oder dem Süden Alaskas, wo man die Kunst der Kriegsführung bereits seit Längerem beherrschte. Die Auseinandersetzungen waren aber wahrscheinlich nicht besonders heftig.

Um 1200 führten die günstigen klimatischen Bedingungen schließlich zu einem Bevölkerungswachstum, und die Walfänger entwickelten sich zu immer komplexeren Gesellschaften, mit einem größeren Anteil sesshafter Menschen und zunehmendem Fernhandel. Einige Jahrhunderte später etablierte sich dort die Kriegsführung. Doch am schlimmsten wütete der Krieg im 19. Jahrhundert und dezimierte die Bevölkerung empfindlich. Genau das sind die Konflikte, die sich in den mündlichen Überlieferungen noch heute wiederfinden. Ausgelöst wurden sie vor allem durch die Expansion Russlands, als sibirische Unternehmen ein riesiges Handelsnetz bis nach Alaska aufbauten, was bei den Stammesgruppen im Gebiet der Beringstraße starke territoriale Besitzansprüche schürte.

Die Debatte über den Krieg und die menschliche Natur wird in absehbarer Zukunft wohl kaum beendet sein. Die Vorstellung, dass tödliche Gewaltausbrüche bereits seit der Frühzeit des Menschen allgegenwärtig waren und Kriegsführung somit einen Wesenszug unserer Spezies darstellt, hat viele Anhänger. Wenn man aber alle Indizien betrachtet, gewinnen die »Tauben« letztlich die Oberhand. Denn bisher liefern die archäologischen Funde nur wenige oder gar keine Anhaltspunkte dafür, dass Kriege schon immer zum Leben dazugehörten.

Menschen kämpfen, und manchmal töten sie. Und wenn es die Umstände und ihre Kultur erfordern, führen sie auch Kriege. Die Voraussetzungen dafür entwickelten sich allerdings erst in den letzten 10000 Jahren – an den meisten Orten sogar noch viel später. Somit scheint die amerikanische Ethnologin Margaret Mead (1901–1978) Recht zu behalten, die 1940 einen Artikel mit folgender Überschrift veröffentlichte: »Kriegsführung ist nur eine Erfindung – keine biologische Notwendigkeit.« ◂



FOTOLIA / FOTOS 593

QUELLEN

Ferguson, R.B., Whitehead, N.L. (Hg.): War in the tribal zone: expanding states and indigenous warfare. School of American Research Press, 1992

Fry, D.P.: Beyond war: the human potential for peace. Oxford University Press, 2007

Otterbein, K.F.: The origins of war. Critical Review 11, 1997

Wilson, M.L. et al.: Lethal aggression in *Pan* is better explained by adaptive strategies than human impacts. Nature 513, 2014

ZOOLOGIE

ADEBARS GEHEIMNISSE

Störche mögen vielen vertraut erscheinen, sind aber noch für jede Menge Überraschungen gut.

Selbst im Traumberuf kann es zu Sinnkrisen kommen: »Bei brüllender Hitze und mit der Zähluhr in der Hand beobachten wir also Störche beim Kacken. Bin ich dafür Biologe geworden?«, fragt sich Holger Schulz in seinem äußerst lesenswerten Buch »Boten des Wandels«, in dem er von seiner Forschung über *Ciconia ciconia* berichtet, den Weißstorch. Eine bestens bekannte Art, könnte man meinen, hat der Klapperstorch doch einen festen Platz in unserer Imagination.

Von Kindesbeinen an ist er uns als Vetter Langbein und Adebar aus Märchen und Fabeln vertraut. Er gilt als Frühlingsbote, als Sinnbild von Fruchtbarkeit und ehelicher Treue sowie als Paketdienst für Nachwuchs. Jenseits aller Mythologie und Symbolik lernen wir zudem in der Schule einiges über das Verhalten der Vögel und ihre viele tausend Kilometer langen Zugrouten nach Afrika. Ist der Storch nicht schon längst erforscht?

Schulz schlüsselt auf wunderbare Weise auf, wie vielfältig das Verhalten der Tiere tatsächlich ist, wie anpassungsfähig diese Überlebenskünstler auf Herausforderungen reagieren. Da bleibt nicht viel übrig von vermeintlichen Gewissheiten. So ist beispielsweise das Bild vom Storch, der im flachen Wasser stakt und bevorzugt Frösche frisst, zu einfach gemalt. Die Vögel sind Fleischfresser und in ihrer Diät wenig wählerisch, ob ihnen nun

Holger Schulz
BOTEN DES WANDELS
Den Störchen auf der Spur
Rowohlt, Hamburg 2019
271 S., € 14,99



Weißstorchenpaare bleiben ihrem Nistplatz, dem so genannten Horst, mitunter jahrzehntelang treu. Von allen Vögeln Europas bauen sie die größten Nester.

Amphibien, Mäuse, Schlangen, Insekten oder anderes Getier vor den Schnabel kommen.

Wie Schulz und seine Kollegen in abenteuerlichen und oft auch mühseligen Expeditionen nachweisen konnten, favorisieren die Tiere seit einiger Zeit eine gänzlich unerwartete Nahrungsquelle: Mülldeponien. Das Angebot für die Störche scheint dort so reichhaltig, dass sie manchmal auf Abfallhalden in Südeuropa überwintern und die riskante Reise nach Afrika ganz ausfallen lassen.

Der Trip ist unter anderem deshalb so gefährlich, weil die Vögel als Segelgleiter auf gute Thermik angewiesen sind, also auf Aufwinde durch hochsteigende warme Luft. Über großen Wasserflächen ist die rar, deshalb gabelt sich der Zug der Störche in eine Ost- und eine Westroute rund um das Mittelmeer auf. Welchen Weg genau sie nehmen, wo sie rasten und ihre Endstation finden, hängt von der jeweiligen Thermik und dem aktuellen Nahrungsangebot ab.

Das macht die Routen unberechenbar, und Schulz' Berichte von Forschungsexpeditionen gen Süden auf den Spuren der Vögel sind allein die Lektüre wert. Mit aus heutiger Sicht vorsintflutlicher Ausstattung ohne Mobiltelefon, Internet und Satellitentechnik musste Schulz vor Jahrzehnten die fraglichen Gebiete in Afrika möglichst engmaschig nach den Vögeln absuchen – trotz Sandstürmen, Gewittern und Heuschreckenplagen.

Wie abgeschnitten er dabei von der Heimat war, zeigt jene Episode, als er im Postamt von Khartum einen Brief von seiner Frau las und ihm entnahm, dass seine kleine Tochter die Operation gut überstanden habe. Welche Operation? Schulz muss den nächsten Flieger nach Hause nehmen, um mehr über den erfolgreichen Eingriff zu erfahren. Heute dagegen kann er täglich Updates seiner Storchen-Expeditionen ins Internet stellen.

Federleichte Sender auf dem Rücken der Störche erlauben es mittlerweile, deren Bewegungen punktgenau verfolgen. So ließ sich bereits deren Vorliebe für Müllhalden bestätigen. Das wirft Fragen für den Naturschutz auf, weil organischer Müll nicht mehr auf Deponien landen soll. Können sich die Störche, wenn diese Quelle versiegt, auf ihr angestammtes Verhalten besinnen? Gibt es für sie noch genügend reichhaltige Naturlandschaften?

Es bleibt zu hoffen, dass Schulz einen ebenso spannenden Nachfolgeband über jene Erkenntnisse schreibt, die die Forschung an *Ciconia ciconia* erst noch liefern wird. Die berüchtigte Zähluhr hat aber schon jetzt eine wichtige Einsicht geliefert. Steigen die Temperaturen, kühlen sich Störche über Harnstoff ab. Ihre Ausscheidungen landen dann nicht mehr auf dem Boden, sondern gezielt und mit angepasster Frequenz auf den eigenen Beinen: je heißer es wird, desto häufiger.

Die Rezensentin Susanne Wedlich ist Biologin und arbeitet als Wissenschaftsautorin in Münster.

Johannes Krause, Thomas Trappe
DIE REISE UNSERER GENE
Eine Geschichte über uns und unsere Vorfahren
Propyläen, Berlin 2019
283 S., € 20,–



GENETIK
VON BESTAND WAR NUR DER WANDEL

Die Wissenschaftsdisziplin der Archäogenetik belegt: Ohne Migration gäbe es uns nicht.

Als Steven Spielberg 1993 mit »Jurassic Park« die Saurier auf der Kinoleinwand auferstehen ließ, schien mit uraltem Genmaterial alles möglich. Eine wahre Welle von DNA-Sequenzierungen brach damals los, wie aus diesem Buch hervorgeht. Überschäumender Entdeckergeist ließ Wissenschaftler dabei häufig hanebüchene Studien veröffentlichen und manchmal sogar ihre eigene DNA analysieren, mit der sie die Proben aus Versehen verunreinigt hatten. Die »wilden Jahre« nennt Autor Johannes Krause diese Phase »überschießender Euphorie« der jungen Archäogenetik in den 1990er Jahren. Inzwischen habe die Disziplin »die Pubertät hinter sich gelassen« und erweitere die Möglichkeiten historischer Forschung um ein Vielfaches. Zeit also für eine erste Bestandsaufnahme.

Der Buchautor selbst hat großen Anteil an der rasanten Entwicklung des Forschungsgebiets, zählt Johannes Krause doch als Direktor des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte in Jena zu den wichtigsten Archäogenetik-Experten weltweit. Während seiner Dissertation Anfang der 2000er Jahre war er an der Entschlüsselung des Neandertalergenoms beteiligt; 2010 entdeckte er mit Kollegen anhand von Genanalysen eine neue Urmenschenform – den Denisovaner. Krause verbindet in seinem Werk glaubwürdig die Geschichte der Archäogenetik mit seinem eigenen Werdegang. Gleichzeitig beantwortet er grundsätzliche Fragen zu Methodik und Inhalt: Was kann die Archäogenetik leisten? Welches Erbmaterial nutzen die Wissenschaftler? Was ist heute schon mit wenigen Milligramm Knochen möglich, und woher stammen die Fossilien?

Der Hauptteil des Werks umreißt eine lebendige Ur- und Frühgeschichte des Menschen, wie sie aus den Ergebnissen moderner Genanalysen ablesbar ist. Hier zeigt sich eindrucksvoll das Potenzial der Archäogenetik. Eines hebt der Autor dabei hervor: Ohne Migration wäre der Mensch nicht zu dem geworden, was er heute ist.

Drei große Wanderbewegungen stellt er dabei in den Fokus, die sich noch immer in der DNA der Europäer ablesen lassen. So breitete sich von Afrika kommend der *Homo sapiens* vor etwa 40 000 Jahren nach Europa und Asien aus und verdrängte andere Menschenformen, etwa den Neandertaler – wobei er sich allerdings gelegentlich mit diesem fortpflanzte, weshalb wir Neandertaler-Spuren noch heute in unserem Erbgut tragen. Jäger und Sammler streiften dann

über den Kontinent, bis vor etwa 8000 Jahren Einwanderer aus Anatolien den Ackerbau in unsere Breiten brachten. Es folgte eine Phase, in der Großfamilien die Jäger verdrängten, beide aber auch nebeneinanderher lebten und sich vermischten. Übrigens hatten die Alteingesessenen eine weitaus dunklere Haut als die Neuankömmlinge. »Die Antwort liegt im Speiseplan der nahöstlichen Ackerbauern, die ihren Fleischkonsum drastisch reduzierten, wie Isotopenanalysen ihrer Knochen zeigen. Im Gegensatz zu den Jägern und Sammlern nahmen sie kaum Vitamin D über Fisch oder Fleisch zu sich, sondern ernährten sich fast durchweg vegetarisch, ergänzt durch Milchprodukte«, erklärt Krause. Dank ihrer helleren Haut konnten sie das lebenswichtige Vitamin D, das in der Nahrung fehlte, in ihrem eigenen Körper bilden – vermittelt durch das Sonnenlicht.

Eine dritte große Wanderbewegung setzte vor etwa 5000 Jahren ein. Vertreter der Jamnaja-Kultur aus der Steppe nördlich des Schwarzen Meers gelangten in großer Zahl nach Europa – und mit ihnen das Rad, Innovationen in der Viehzucht sowie die Bronzeverarbeitung. Die Jamnaja-Menschen verdrängten etwa 80 Prozent der lokalen Bevölkerung. Möglicherweise »halfen« dabei Pestepidemien, die den Einwanderern vorausgeeilt waren. Die Ausbreitung von Krankheiten, von der Frühgeschichte bis zur Neuzeit, ist überhaupt ein wichtiges Forschungsfeld der Archäogenetik. Denn die Wissenschaftler nehmen auch alte Keime unter die Lupe und gewinnen wertvolle Informationen darüber, wie sich Seuchen in Zukunft bekämpfen lassen: »Indem wir durch den Vergleich alter und moderner Erreger verstehen, wie diese sich in den zurückliegenden Jahren und Jahrhunderten evolutionär entwickelten und was die DNA der Menschen dem entgegensetzte, helfen wir der Medizin, auch künftig im Wettrüsten mithalten zu können.«

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse sind in dem Buch äußerst zugänglich und unterhaltsam aufbereitet und durch Infokästen und Karten ergänzt. Großen Anteil daran hat Koautor und Journalist Thomas Trappe, der zudem die migrationsbezogenen Erkenntnisse in aktuelle gesellschaftliche Debatten einordnet. Wohltuend unaufgeregt räumen Wissenschaftler und Journalist auf mit dem Mythos europäischer »Urvölker«, die von einfallenden Horden aus dem Paradies vertrieben worden seien. Die heute auf dem Kontinent lebenden Menschen seien vielmehr »das Produkt einer Jahrtausende zurückreichenden Mobilität, in der es stetig Austausch, Verdrängung, Kämpfe und sicher auch jede Menge Leid gab. Es gibt aber keinen Grund, die heutigen Europäer als Nachfahren der Opfer dieser Umbrüche zu betrachten«, fassen die Autoren zusammen. In unserem Erbmaterial ließen sich »bis heute Spuren von Einwanderung, Verdrängung und Kooperation« ablesen, doch trügen wir keine Gene in uns, die uns als Angehörige einer bestimmten Volksgruppe oder gar einer Nation auswiesen.

Der Rezensent Sebastian Hollstein ist Wissenschaftsjournalist in Jena.

Thomas Sünder, Dr. Andreas Borta
GANZ OHR
Alles über unser Gehör und wie es uns geistig fit hält
Goldmann, München 2019
384 S., € 14,–



MEDIZIN
WIDER DEN HÖRVERLUST

Ein Mediziner und ein ehemaliger DJ zeigen auf, warum es bei einsetzender Schwerhörigkeit wichtig ist, nicht zu lange mit einem Hörgerät zu warten.

Unser Gehör lässt mit zunehmendem Alter nach. Jede(r) dritte über 50-Jährige und jede(r) zweite über 70-Jährige ist schwerhörig. Nicht nur die eingeschränkte Schallwahrnehmung ist daran problematisch: Das Risiko, eine Demenz zu entwickeln, liegt für Schwerhörige um 400 Prozent höher als für normal Hörende. Schwerhörigkeit befördert die Entstehung einer Demenz außerordentlich stark, verglichen mit anderen Risikofaktoren.

Diese wissenswerten Tatsachen und vieles mehr vermitteln Thomas Sünder und Andreas Borta in ihrem wunderbaren Buch, das durchweg spannend und unterhaltsam ist. Thomas Sünder hat als ehemaliger DJ, Hörsturz-, Tinnitus- und Morbus-Menière-Betroffener reichlich persönliche Erfahrung zum Thema gesammelt und sich eingehend mit medizinischer Forschung und Hörakustik beschäftigt. Sein Koautor Andreas Borta ist Psychologe sowie Mediziner und arbeitet daran mit, medikamentöse Behandlungsmöglichkeiten bei Hörverlust zu entwickeln.

Eingangs schildert Sünder einen heftigen Schwindelanfall, den er während eines Auftritts als DJ erlitt und an dessen Ende die Diagnose »Morbus Menière« stand. Diese Episode ist in dem Buch so anschaulich beschrieben, dass einem beim Lesen fast schlecht wird. Die Geschichte von Sünders Erkrankung und die persönlichen Konsequenzen, die sich für ihn daraus ergeben, durchziehen das Buch wie ein roter Faden. Interessant und ernüchternd sind dabei auch seine Erfahrungen mit dem deutschen Gesundheitssystem und dem Gebaren der Rentenversicherung.

Im ersten Teil des Werks geht es darum, wie das Ohr zu dem hoch entwickelten Sinnesorgan wurde, das es heute ist. Vom Gleichgewichtsorgan bei Hohltieren über das Seitenlinienorgan der Fische bis hin zu unserer ausdifferenzierten Hörschnecke erklären die Autoren ausführlich die Hintergründe. Dabei vermitteln sie auch physikalische Zusammenhänge lebendig und fesselnd.

Doch das Ohr ist nicht allein für die Schallwahrnehmung verantwortlich. Das »echte« Hören findet nämlich erst statt, wenn etwa 3000 Haarzellen des Innenohrs ihre Eindrücke an rund 30 000 Nervenfasern weitergegeben



Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

UNSPLASH / PAUL BYRNE (https://unsplash.com/photos/IYLGjS75V1I)

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

3. 6. 2019	Redaktionsbesuch bei **Spektrum**.de, Heidelberg
5. 7. 2019	Leserexkursion zu EUMETSAT, Darmstadt *(ausgebucht, neuer Termin 2020)*
20. 9. 2019	Leserexkursion zum Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**

22. 5. 2019	Kolloquium der Daimler und Benz Stiftung »Roboter in der Pflege«, Berlin
23. 5. 2019	Lesung von Steve Ayan »Ich und andere Irrtümer«, Stuttgart
25.–28. 6. 2019	Konferenz »The Science of Consciousness (TSC) 2019«, Interlaken
19. 7. 2019	Schreibwerkstatt bei **Spektrum** der Wissenschaft, Heidelberg
7. 8. 2019	Vortrag »Auf den Spuren der Pinguine«, Heidelberg
7. 9. & 5. 10. 2019	Laborkurs: CRISPR-Whisper-Experiment »Aus blau mach weiß«, Berlin
13. 9. 2019	**Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Offenbach
22. 11. 2019	**Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Pasta, Pomodore, Parmigiano: Physik pur«, Frankfurt

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im Juni: **Spektrum** der Wissenschaft SPEZIAL, Physik · Mathematik · Technik Ausgabe 4.18 »Faszination Algebra«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Leserreisen

Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours
Kurzreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein«, organisiert von Wittmann Travel
Islands faszinierende Geologie, zwei besondere Exkursionen durchgeführt von Mol Reisen
Vorzugskonditionen für drei ausgewählte Reisen mit travel-to-nature: Erleben Sie die Schönheit **Namibias**, die bunte Kultur **Perus** oder lassen Sie sich bei einer Fotoreise durch **Costa Rica** die Vielfalt des grünen Landes zeigen!

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

haben und diese dann in etwa 100 Millionen Neuronen der Hörrinde des Gehirns analysiert werden. Das Denkorgan verarbeitet die Eindrücke nicht nur und gleicht sie ab, sondern gibt auch Rückmeldungen an die Ohren, welche die weitere Hörinformation beeinflussen.

Im Fall einer Altersschwerhörigkeit kann das Gehirn lange Zeit fehlende Höreindrücke ergänzen, so dass sich die Symptome zunächst nur dezent bemerkbar machen. Doch Nervenbahnen, die nicht genutzt werden, bilden sich zurück, und offensichtlich setzt dieser Abbau einen Mechanismus in Gang, der die Demenzentstehung begünstigt. Die Studie, die das Autorenduo zu diesem Thema zitiert, hat aber auch gezeigt: Das Demenzrisiko liegt bei jenen, die ein Hörgerät tragen, nicht höher als bei normal Hörenden. Man kann also etwas tun.

Erste Anzeichen für eine beginnende Altersschwerhörigkeit sind, wenn man den Fernseher laut stellen muss und bei starken Umgebungsgeräuschen die Ansprache von anderen zunehmend schlechter verstehen kann. Beides sollte Anlass sein, einen Hörtest zu machen. Einen versteckten Hörverlust auszugleichen, ist für das Gehirn sehr anstrengend und lässt einen schnell ermüden. Da verloren gegangene Verbindungen zum Gehirn nicht wieder aufgebaut werden, sollte man sich mit der Entscheidung für ein Hörgerät nicht allzu viel Zeit lassen.

Sünders Erkrankung führte letztlich dazu, dass er seinen Beruf als DJ aufgab und mit einer Umschulung zum Hörakustiker liebäugelte (die von der Rentenversicherung aber nicht genehmigt wurde, weil DJ kein Ausbildungsberuf ist und nur auf »gleichwertige« Berufe umgeschult werden kann). Im letzten Teil des Werks gibt er tiefe Einblicke in die moderne Welt der Hörgerätetechnik. Er beschreibt die neuesten Hightech-Hörgeräte sehr ambitioniert und erhellend. Die einprogrammierte Simultanübersetzung von Fremdsprachen ist allerdings noch Zukunftsmusik.

Interessant sind auch die Ausführungen der Autoren zum Thema Lärm. In der Ursachenliste umweltbedingter Erkrankungen steht Lärm gleich an zweiter Stelle, direkt hinter Luftverschmutzung. Vor allem der meist negativ bewertete Fluglärm hat viele gesundheitliche Konsequenzen – von Depressionen über Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Schlaf- bis zu Herzrhythmusstörungen. Physikalisch gesehen ist laute Musik für die Ohren genau das Gleiche wie Lärm. Doch bei Ersterer werden (vorausgesetzt, sie gefällt einem) anders als bei Zweiterem viele Glückshormone ausgeschüttet. Die Autoren hätten noch etwas detaillierter auf die individuell unterschiedliche Bewertung von Höreindrücken eingehen können sowie auf Wechselwirkungen zwischen Höreindrücken und psychischen Empfindungen. Möglicherweise würde das aber ein weiteres Buch füllen.

Das Werk ist absolut lesenswert für alle, die mehr über ihre Ohren und den Hörsinn wissen möchten, und ganz besonders für jene, die mit Erkrankungen wie Hörsturz, Hörverlust, Tinnitus oder Morbus Menière konfrontiert sind. Die Autoren haben viel Wissen in eingängiger Lektüre verpackt. Und wer es noch genauer haben will, der findet ein ausführliches Literaturverzeichnis im Anhang.

Die Rezensentin Tanja Neuvians hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg bei Heidelberg.

PHYSIK
KOSMISCHE RÄTSEL

Ein Physiker erklärt, wie die Phänomene von Raum und Zeit zusammenhängen.

Martin Bäker
ISAAC ODER DIE ENTDECKUNG DER RAUMZEIT
Springer, Berlin und Heidelberg 2019
562 S., € 24,99



Was wir über Raum und Zeit zu wissen glauben, gilt in einigen Teilen des Universums, in vielen aber auch nicht. Etwa in der Nähe massereicher kosmischer Objekte oder in der Welt der subatomaren Teilchen. Solche Dinge lassen sich laut Martin Bäker besser verstehen, wenn man sich nicht auf der Oberfläche eines Planeten befindet, sondern weit draußen im All, möglichst weit weg von jeder Schwerkraft und unbeeinflusst von Dingen wie Reibung oder Luftwiderstand.

Darum nimmt Bäker, Physiker an der TU Braunschweig, seine Leser in diesem Buch mit in ein quaderförmiges, hell erleuchtetes Labor im Nirgendwo. Er bedient damit das Sciencefiction-Motiv des Lebens in Raumstationen. In dieser Umgebung siedelt er Dialoge an zwischen einem humanoiden Roboter namens Isaac und einem Menschen mit dem Namen San. Isaac soll in Laborexperimenten herausfinden, wie sich Objekte in Raum und Zeit verhalten. Hierfür stehen ihm zum Beispiel Laser und diverse Sensoren zur Verfügung. San, quasi sein Lehrer, unterstützt ihn beim Formulieren der richtigen Fragen und beim Interpretieren der Erkenntnisse.

Existiert ein Raum? Gibt es einen, der absolut leer ist? Vergeht die Zeit wirklich, oder ist sie eine Illusion? Da wir Raum und Zeit nicht direkt beobachten können, müssen wir untersuchen, wie sich Objekte darin verhalten, lässt Bäker San sagen und gibt damit einen Ausblick auf die Themen, die im Buch zur Sprache kommen.

Der Autor beginnt mit der Mechanik, unter anderem mit Bewegungen in der newtonschen Raumzeit. Diese ist geprägt durch ein absolutes Bezugssystem für die Zeit und ein davon unabhängiges absolutes Bezugssystem für den Raum. Im Alltag verwenden wir unbewusst ein solches und beziehen es auf die Erde, die aus unserer Sicht stillsteht. Das ist sinnvoll, denn in Bezug auf unseren Planeten kommen Objekte unserer Umgebung, auf die keine Kräfte einwirken, immer zum Stillstand – der Tatsache geschuldet, dass es auf der Erde keine Bewegung ohne Reibung gibt. Bei zwei Galaxien beispielsweise ist das anders, dort kann man nicht eindeutig sagen, welche sich bewegt und welche nicht.

Bäker geht sodann auf geodätische Zusammenhänge ein, die bereits weit über das hinausgehen, was man unmittelbar ausprobieren könnte. Auf der Erdoberfläche etwa ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten keine Gerade, sondern eine gekrümmte Linie entlang einer (idealisierten) Kugeloberfläche. Der Roboter Isaac in dem Buch erkennt, dass die Methoden zur Entfernungsmessung kompliziert werden, sobald man sich auf einer gekrümmten Fläche befindet. Noch schwieriger – und für uns intuitiv nicht mehr vorstellbar – wird es, wenn kein zweidimensionales Areal, sondern der dreidimensionale Raum gekrümmt ist. Und besonders vertrackt: wenn man in die Nähe von Schwarzen Löchern kommt. Denn dort lässt sich der Raum so beschreiben, dass er in das Loch hineinstürzt. Bäker erläutert diese Vorstellung in seinem Werk.

Im Lauf des Buchs verheiratet der Autor den Raum mit der Zeit. So zeigt er: Der Abstand zweier Raumpunkte zur selben Zeit ist für alle Beobachter immer gleich, aber der Abstand zweier Ereignisse zu verschiedenen Zeiten kann je nach Beobachter beliebige Werte annehmen. Daraus ergab sich das Konzept der Raumzeit, das der deutsche Mathematiker und Physiker Hermann Minkowski im Jahr 1909 einführte. Er vereinigte Raum und Zeit zu einem vierdimensionalen Gebilde. Albert Einstein stand jener Idee zunächst kritisch gegenüber. Später entwickelte er auf dieser Grundlage die allgemeine Relativitätstheorie. Laut dieser lässt sich die Gravitation als ein geometrisches Phänomen der Raumzeit verstehen.

Lichtgeschwindigkeit und Einsteins Theorien fordern in dem Buch selbst Isaacs kognitive Ressourcen heraus. Bäker erläutert, unter anderem im Zuge der Dialoge zwischen Isaac und San, sowohl die allgemeine als auch die spezielle Relativitätstheorie und erklärt anschaulich ihren Zusammenhang zu Raum und Zeit – wobei er der Frage nachgeht, wie stark Materie die Raumzeit krümmt. Dabei zieht er das Beispiel zweier Neutronensterne heran, die eng umeinanderkreisen.

Bäkers Buch ist aufschlussreich und ergiebig, erinnert aber an ein Lehrbuch der Physik für die Oberstufe. Der Autor macht regen Gebrauch von Formeln, was für das Verständnis nicht unbedingt nötig gewesen wäre – gelegentlich wirkt es sogar so, als hätte er anders keine Möglichkeit der Erklärung gefunden. Über den Lehrbuchcharakter hinwegtäuschen können auch nicht die Dialoge von San und Isaac; immerhin lockern sie das Werk unterhaltsam auf, was auch das Ziel des Autors war. Zahlreiche Schwarz-Weiß-Grafiken unterstützen das Verständnis. Alles in allem fragt man sich, wohin der Autor mit seinem Werk wollte: in das populäre oder doch eher in das Fachsegment?

Der gut 550 Seiten starke Band ist gespickt mit fundiert aufbereitetem

physikalischem Wissen. Der Anhang steigt noch tiefer ein in die Mathematik und bringt eine Formelsammlung, die laut dem Autor helfen soll, die allgemeine Relativitätstheorie besser zu durchdringen. Ein hilfreiches Glossar rundet das Werk ab. Für die Lektüre benötigt man dennoch reichlich Vorwissen und Durchhaltevermögen; der Band richtet sich also eher an fachnahe Leser(innen).

Der Rezensent Thorsten Naeser ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

GESCHICHTE
VERWEHTE SPUREN

Von Punt bis zu den Pelasgern stellt ein Sprachwissenschaftler Kulturen vor, von denen wir heute kaum noch wissen.

Ägypter, Griechen, Römer – sie alle haben ihren Platz in der Geschichte. Wie sieht es aber mit Kulturen aus, deren Spuren zum größten Teil verloren gegangen sind, an die allenfalls noch versprengte archäologische Überreste erinnern oder über deren Existenz wir en passant aus Berichten anderer Kulturen wissen? »Randkulturen« wie das sagenhafte Goldland Punt, das wir aus einem Expeditionsbericht der ägyptischen Pharaonin Hatschepsut (regierte 1479–1458 v. Chr.) kennen, oder das paradiesische Dilmun am Persischen Golf (Bahrein), in dem Mitte des 2. Jahrtausends v. Chr. wertvolle Handelsgüter umgeschlagen wurden und über das sumerische Keilschrifttexte berichten?

Ausgehend von der Intention, »Spuren vergessener oder an den Rand gedrängter Kulturen ans Licht zu bringen«, begibt sich der in Finnland lebende Sprachwissenschaftler Harald Haarmann auf »25 verlorene Pfade der Menschheit«. In chronologisch sortierten Kapiteln geht er der Frage nach, warum manche Kulturen vergessen wurden, welche Elemente von ihnen vielleicht noch weiter existieren und in welcher Form.

Haarmann nimmt seine Leser mit zu steinzeitlichen Siedlungen am Baikalsee; er stellt die Pelasger vor, die vorindoeuropäische Bevölkerung Griechenlands; und er zeigt, dass die ersten Tempelbauten der Menschheit nicht etwa von sesshaften Ackerbauern im Zweistromland oder im Niltal errichtet wurden, sondern Jahrtausende früher von Jägern und Sammlern im ostanatolischen Göbekli Tepe.

Bei seinem Versuch, mehr über die »Randkulturen« ans Licht zu bringen, findet Haarmann einen historischen Kern in den Geschichten über die Amazonen-Kriegerinnen vom Schwarzen Meer, und er weist nach, dass die blutrünstigen Stierkämpfe der Moderne auf die friedlichen rituellen Stierspiele des minoischen Kreta zurückgehen. Zudem beschreibt er mit der Donauzivilisation vor rund 6000 Jahren die erste europäische Hochkultur, in der schon früh das Modell einer egalitären Gesellschaft auf hohem zivilisatorischem Niveau praktiziert wurde.

Dass solche »Außenseitergemeinschaften« überhaupt aus dem Dunkel der Geschichte heraustreten können, verdankt die Wissenschaft immer ausgeklügelteren technischen Verfahren. Als Beispiel hierfür verweist Haarmann auf die »Schöninger Speere«: Waffenfunde im östlichen Niedersachsen, die sich mittels Thermolumineszenz-Analyse dem *Homo heidelbergensis* zuordnen lassen. Dieser war eine Homininenspezies, die zwischen 800 000 und 300 000 v. Chr. in Europa lebte.

Haarmanns Buch fordert dazu auf, globaler zu denken. Die vormoderne Welt, so der Autor, sei weitaus vernetzter gewesen als bislang angenommen. Darauf deuten etwa mögliche Spuren einer eiszeitlichen Migration nach Amerika hin, denen der Autor ebenso nachgeht wie der Frage, warum 4000 Jahre alte Mumien in der zentralasiatischen Taklamakan-Wüste europide Genmerkmale aufweisen. Und dass Nachkommen der vorkolumbischen Chachapoya-Kultur von den Peruanern »gringuitos« (»kleine weiße Ausländer«) genannt werden (Analysen von deren Genom deuten eindeutig auf eine europäische Herkunft hin), ist Haarmann zufolge ein Indiz dafür, dass der Kulturkontakt zwischen Amerika und Europa schon vor Kolumbus stattgefunden hat.

Oftmals, so eine weitere Feststellung des Autors, trübt unsere allzu eurozentrische Sichtweise den Blick dafür, dass indigene Kulturen in Amerika und Afrika schon lange vor der Ankunft der Europäer einen hohen Zivilisationsgrad erreicht hatten. Haarmann verweist auf Satellitenaufnahmen, die belegen, dass das Amazonasbecken vor der Conquista keineswegs ein naturbelassener Urwald war, sondern opulente präkolumbische Großsiedlungen beherbergte. Eine Erkenntnis, die auch für das vorkoloniale Afrika gilt, wo verschiedene einheimische Hochkulturen weit gespannte Handelsnetze unterhielten, wie etwa die Zyklopenmauern von Simbabwe zwischen dem 11. und dem 15. Jahrhundert zeigen.

Mit der Palmyrenerin Zenobia, der Königin von Saba und den Etruskern beleuchtet der Autor historische Akteure, die sehr wohl ihre Spuren hinterlassen und den Lauf der Geschichte verändert haben; die allerdings – gemessen an ihren Leistungen – wenig Aufmerksamkeit bekommen, weil nachfolgende Zivilisationen die Erinnerung an sie marginalisierten oder weil ihre Errungenschaften anderen Kulturen zugeschrieben wurden.

»Vergessene Kulturen der Weltgeschichte« ist ein Buch mit hohem Erkenntnisgewinn, das neugierig macht und uns lehrt, die Geschichte mit anderen Augen zu sehen.

Der Rezensent Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.

Harald Haarmann
VERGESSENE KULTUREN DER WELTGESCHICHTE
25 verlorene Pfade der Menschheit
C.H.Beck, München 2019
224 S., € 18,–



SPIONAGE OHNE GRENZEN

Verborgene visuelle Informationen erlauben es, auch Objekte zu fotografieren, die eigentlich außerhalb des Sichtfelds liegen (»Um die Ecke geblickt«, **Spektrum** März 2019, S. 58).

Dieter Meinert, Geeste: Sobald diese Methode hinreichend funktioniert, wird sie die Spionage revolutionieren. Vermutlich hat das schon mit dem Erscheinen der ersten entsprechenden Paper eingesetzt. Wenn auch nur ein wenig Licht aus einem Raum dringt, kann man mithören, was dort verhandelt wird, und sehen, wer verhandelt – und das mittels alltäglicher Geräte und Software, die auf jedem Heimcomputer laufen dürfte. Dann bleibt der Menschheit insgesamt und speziell der Politik und der Wirtschaft nur noch die Wahl zwischen Bunkermentalität und radikaler Offenheit. Hoffen wir, dass Letztere sich durchsetzt.

Wolfgang Gahr, per E-Mail: Im vorigen Jahrtausend war ich während einer partiellen Sonnenfinsternis in der Türkei und beobachtete zu meinem Erstaunen, dass unter einem Baum am Boden lauter kleine Mondsicheln abgebildet wurden. Die Lücken zwischen den Blättern wirkten wie kleine Lochkameras und zeigten die partiell verfinsterte Sonne. Da normalerweise die volle Sonnenscheibe dargestellt wird und die hohe Umgebungshelligkeit dazukommt, fällt das sonst nicht auf.

WIE GELINGT DIE SYNCHRONISATION?

Die Physiker Philip Walther und Časlav Brukner zeigten, dass im Mikrokosmos die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung manchmal nicht mehr eindeutig ist (»Kausalität in der Quantenwelt«, **Spektrum** April 2019, S. 12).

Detlev Roßbach, Erlangen: Ob die beschriebenen Effekte auch auf die Raumzeit der allgemeinen Relativitätstheorie wirken, muss sich erst noch zeigen. Der Artikel deutet an, dass das wohl schwierig nachzuweisen werden wird.

Zu dem Gedankenexperiment »Schwerkraft und Quantenkausalität« stellt sich mir in diesem Zusammenhang eine Frage: Damit Alice und Bob ihre Ereignisse jeweils (genau) um 10 Uhr vermessen können, müssen ihre Uhren synchron laufen, was durch eine Synchronisation um 9.55 Uhr erreicht werden soll. Wenn jedoch die beiden Ereignisse, die jeweils in den Laboren von Alice und Bob stattfinden, raumartig getrennt sind, sich also außerhalb des Ereignishorizonts des jeweiligen Partners befinden, wie kann dann eine Synchronisation gelingen? Ich gehe davon aus, dass sich die Uhren unmittelbar bei den jeweiligen Ereignissen befinden. Für die Synchronisation müsste doch zwischen den beiden Uhren irgendeine Form von Signalaustausch stattfinden, was aber – da die beiden laut Voraussetzung raumartig getrennt sind – nicht möglich ist. Wenn es aber auf die Synchronisation der Uhren nicht ankommt, so könnte es doch sein, dass die Messungen zu so unterschiedlichen Zeiten stattfinden, dass aus der raumartigen Trennung eine licht- oder zeitartige wird, was den Signalaustausch zwischen Alice und Bob wieder ermöglichen würde, aber im Gegensatz zur Voraussetzung steht. Wo ist also der Widerspruch?

Antwort der Autoren Philip Walther und Časlav Brukner: Sie haben Recht, dass in dem von uns beschriebenen Protokoll die beiden Uhren synchron sein müssen. Um nun bei beiden räumlich getrennten Uhren eine synchronisierte Zeit (etwa 9.55 Uhr) zu etablieren, kann man zum Beispiel die einsteinsche Vorgehensweise anwenden: Wenn eine Lichtquelle sich auf halben Weg zwischen den beiden Positionen der Uhren befindet und diese nun in beide Richtungen ein Lichtsignal ausschickt, kann das Ankommen des Lichtsignals zum Gleichstellen der Uhren genutzt werden. Wesentlich ist natürlich, dass dieses Verfahren noch vor dem Beginn unseres Protokolls abgeschlossen sein muss, damit die Uhren um 9.55 Uhr bereits synchron laufen. Nun wird als nächster Schritt die Masse in die Nähe von Alices oder in die Nähe von Bobs Labor gebracht, oder – wie im Artikel dargestellt – in Superposition von diesen beiden Orten, um somit die Reihenfolge der späteren Ereignisse unbestimmt zu haben.

Johannes Tille, Großzimmern: Zum ersten Mal seit vielen Jahren tat mir ein **Spektrum**-Titelbild sofort in den Augen weh! Alle Quantenwelten können nicht verschwimmen lassen, dass der Faden, an dem die linke ausgelenkte Kugel hängt, grob geschätzt etwa 2,5 Zentimeter zu kurz ist, um die Nachbarkugel auf Höhe ihres Mittelpunkts zentral zu treffen – zumindest, wenn man die 30 Grad Auslenkung beibehält. Auch bei Fotomontagen sollte man Physik und Geometrie beachten, selbst wenn das Ergebnis dann etwas weniger spektakulär aussieht.



Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

Heimkehr

Ein Sternenreisender kehrt zurück ins Sonnensystem.
Eine Kurzgeschichte von Axel Kruse

20 Jahre sollten eigentlich ausreichen, um Gras über die Sache wachsen zu lassen. Dachte ich. Aber hier am Zoll in Lunas größtem Raumhafen spürte ich noch immer die Repressalien, mit denen die Nichtmenschen gegen uns Terraner vorgingen. Schier endlos wischte der Kontrolleur durch meine Unterlagen. Dann sollte ich zweimal meinen Reisebeutel aus- und wieder einpacken. Ich musste mich echt zusammennehmen, um nicht auszuflippen!

Dabei hatten außer mir heute gerade mal vier andere Schiffe angelegt. Nur vier! Was war bloß aus dem einstigen Stolz Terras geworden? Ich war eben eine lange Zeit draußen gewesen. Ganz weit draußen. So weit, dass ich für den Rückflug mehr als drei Jahre gebraucht habe. Mit Zwischenstopps, Übergangsaufenthalten und Hunderten von Sprüngen von System zu System. Jeder war wie ein kleiner Rausch: wie die Sterne verschwanden und kurz darauf an anderer Stelle wieder aufploppten. Kann ich jedem nur empfehlen.

17 Jahre habe ich keinen Gedanken an meine alte Heimat verschwendet, wirklich keinen einzigen. Doch dann war es mal gut gewesen mit dem Rim und den »Abenteuern«, die mich dorthin zogen. Ich hatte genug von der mühsamen Arbeit am Rand der Galaxie, den endlosen Botenflügen und vor allem den Geldsorgen. Sie sind von Anfang an mein treuer Passagier gewesen. Die Credits aus dem Verkauf des Schmucks waren fast vollständig für den alten Armeetransporter draufgegangen. Er hatte ein schickes Sprungtriebwerk, mit dem ich in Nullzeit von Stern zu Stern springen konnte – wenn ich denn genügend Treibstoff hatte. So entfernte ich mich immer weiter von der Erde und fühlte mich wirklich gut dabei.

Fast das Beste war: Bald musste ich den Treibstoff nicht mehr bei den Nichtmenschen des Protektorats einkaufen. Die hatten Terra bekanntermaßen mit einem Embargo belegt, damals, nach dem Waffenstillstand. Ich konnte ja verstehen, dass die Aliens die Menschen nunmehr für die Parias unseres Sektors der Milchstraße hielten. Blöderweise hatten eben wir den Krieg vom Zaun gebrochen.

Aber, und das ist ein großes Aber, es war trotzdem unfair, die komplette Bevölkerung darunter leiden zu lassen. Das stärkte ja bloß den Rückhalt für die Regierung Terras, das verstand doch wirklich jedes Kind. Die einzelnen Menschen waren total friedlich und wollten einfach eine gute Zeit haben. Da konnte man sagen, was man wollte. Nur ihre Anführer bekamen halt manchmal den Hals nicht voll.

Ein paar Jahre nach dem Start meiner Reise, als ich fast ein Viertel des Wegs um die Milchstraße herum zurückgelegt hatte, wurde die Sache mit den Anfeindungen immerhin besser. Dort draußen war ich bloß ein Zellhaufen unter vielen. Von Terra und dem Erdprotektorat hatte hier fast noch niemand gehört. Ich konnte endlich Handel treiben, Frachtaufträge fliegen und Treibstoff zu guten Preisen kaufen. Und ich durfte endlich so sein, wie ich wollte, ganz ohne schlechtes Gewissen.

Spaß konnte man am Rand der Galaxie natürlich auch haben. Immer wenn es ging, verbrachte ich ein paar Tage in einem Raumhafen und versuchte mich im Kasino. Was es da draußen für Glücksspiele gibt – das glaubt man nicht! Aber viel Glück hatte ich nie. Und so hatte ich irgendwann die Schnauze voll und wollte zurück nach Hause. Sentimental, ich weiß, doch ich konnte mich nicht dagegen wehren. Auch wenn man mich hier draußen grundsätzlich ohne Vorurteile empfing, fehlte mir die Gesellschaft von Menschen. Vielleicht hoffte ich auch auf eine weitere Glückssträhne wie damals mit dem Schmuck. Die Halskette mit dem Diamanten sah ich immer noch vor mir: wie die Krümel aus Mondgestein in seinem Inneren das Licht der Sonne brachen – ein Traum. Gregor hatte den Klunker ein Familienerbstück genannt, ihn dann aber doch in die Mitte des Pokertisches gelegt. Über den Rest dachte ich nicht zu viel nach. Ich erinnerte mich aber noch ganz genau an das geile Gefühl, als ich das gute Stück beim Juwelier auf Luna gegen eine unverschämt hohe Summe an Credits eintauschte.

Sollte er die Urnen seiner Eltern besichtigen? Oder gleich ins Kasino gehen?

Je näher ich auf meinem Heimweg dem Gebiet des Erdprotektorats kam, desto mehr spürte ich wieder die Feindlichkeit gegenüber mir als Menschen. Misstrauische Patrouillen stoppten mein Schiff. Mit vorgehaltenen Waffen durchsuchten die Kerle meinen Frachtraum. Die Nichtmenschen hatten wohl nichts vergessen, auch nicht nach 20 Jahren. Schon klar, die Faschisten auf der Erde

hatten übel gewütet, erst eine große Allianz mit einigen abtrünnigen menschlichen Kolonien hatte sie stoppen können. Und dann hatte es ja noch diesen Genozid gegeben. Aber irgendwann war es doch auch mal gut mit den Repressalien, oder?

Als ich hinter der Jupiterbahn ins heimische Sonnensystem eintrat, überlegte ich kurz, ob ich bei Ceres Halt machen sollte. Das war der eigentliche Hub für Waren aus entfernten Ecken des Alls. Die großen Schiffe flogen in der Regel nicht weiter. Sie hätten umso mehr Treibstoff dafür verwenden müssen, sich beim Rückflug wieder aus dem Schwerkraftschacht der Sonne zu befreien. Und die meisten Commander waren ja nicht doof.

Das galt natürlich auch für mich, aber ich wollte zurück nach Luna. Da war ich aufgewachsen, war unzählige Male im Raumanzug in dem Krater vor unserer Behausung herumgeklettert, hatte coole Fotos vom hinaufdriftenden Mondstaub gemacht und viele gute Partys gefeiert. Die Menschen auf Luna hatten diesbezüglich immer Ausdauer bewiesen: Die Feiern gingen gern mal von Sonnenaufgang bis Sonnenaufgang.

Umso enttäuschter war ich von dem wenig entspannten Empfang am Zoll. Das Erdprotektorat wachte seit dem Krieg argwöhnisch über alle Raumhäfen von uns Menschen. Es kontrollierte sämtliche Warenströme, Reisen nach draußen waren nur noch mit Sondergenehmigung gestattet. Ich war nach Kriegsende einer der Letzten gewesen, die einfach so das Sonnensystem verlassen konnten, die Sache war knapp gewesen damals.

Der Zollbeamte interessierte sich sehr für meinen Pass, der selbstverständlich gefälscht war. Akribisch schien er ihn mit irgendeiner Datenbank abzugleichen. Schließlich winkte er mich durch. Nun stand ich in der großen Halle und wusste nicht recht, was ich tun sollte. Nebenan luden Roboter einen Frachter aus, sonst war wenig los. Mir fielen die Kameras auf, die über jeder Ausgangstür installiert waren.

Sollte ich die Urnen meiner Eltern besichtigen? Ich hatte sie fünf Jahre vor meinem Abflug zuletzt gesehen. Sie fanden damals, dass ich mein Leben wegwerfe mit meinen Träumen vom Rim und den schnellen Credits. Nach kurzem Abwägen entschied ich mich dagegen. Am besten wäre es wohl, gleich ins Kasino zu gehen, da wollte ich schließlich auf jeden Fall hin.

Als ich durch die Halle schlenderte, sprach mich ein alter Mann an: »Gregor, du bist Gregor, nicht wahr?«, fragte er. Ich zuckte kurz zusammen, fing mich dann aber sofort wieder. »Nein, mein Name ist Haburn, Robur Haburn«, erwiderte ich.

»Ich hätte schwören können …«, sagte der Mann. »Entschuldigen Sie bitte. Ich suche nach meinem Sohn Gregor.« Seine Augen füllten sich mit Tränen. Ich drehte mich um und wollte ihn stehen lassen, da griff er nach meinem Arm. »Vielleicht kennen Sie ihn ja, meinen Sohn, meine ich. Er muss in Ihrem Alter sein. Er ist vor gut 20 Jahren verschwunden, ich glaube an Bord eines alten Armeefrachters. Das war das einzige Schiff, das zu dieser Zeit das System verlassen hat.«

Ich überlegte kurz, ob ich ihm die Wahrheit sagen sollte. Der Mann tat mir irgendwie leid, wie er dastand, fast nur Lumpen am Körper und mit einer zuckenden Unterlippe. Ich dachte an den Heimweg vom Kasino damals, vor 20 Jahren. An den Streit mit Gregor, der so dreist gewesen war und sein Familienerbstück zurückhaben wollte. An meine überkochende Wut und den Schlag, den ich Gregor verpasste. Ziemlich geschickt hatte ich seinen leblosen Körper draußen im Mondboden verscharrt, in einer Ecke des Kraters vor unserer Unterkunft, wo allenfalls Jugendliche in Raumanzügen herumklettern. Lag er immer noch dort?

»Sie könnten ihn kennen, Sie kommen doch von draußen«, fuhr der alte Mann fort. »Das Protektorat sagt, Gregor sei tot, aber das glaube ich nicht. Wir Menschen müssen zusammenhalten gegen dieses verräterische Pack!« Sein Gesicht hatte einen Ausdruck angenommen, als ob er gleich in Richtung der nichtmenschlichen Zollbeamten ausspucken wollte.

Ich erinnerte mich an die Geschichten darüber, was das Protektorat mit Menschen machte, die mit dem Gesetz in Konflikt gerieten. In einer der Umerziehungsanstalten wollte ich ganz gewiss nicht landen. »Die Alien Force Defense ist auf Terra noch an der Regierung, nicht wahr?«, fragte ich ihn vorsichtig.

Bewegt legte der alte Mann seine Hand auf das Herz und sagte: »Sie ist der einzige Garant für uns Menschen, ohne sie wären wir schon lange untergegangen!« Er beugte sich zu mir herüber und flüsterte mir zu: »Wir werden uns wieder erheben, ja, das werden wir. Wir werden es diesen dreckigen Nichtmenschen zeigen, die nur Elend und Arbeitslosigkeit über uns gebracht haben. Von den Krankheiten ganz zu schweigen.«

Aus dem Augenwinkel sah ich, wie zwei uniformierte Grenzbeamten auf uns zukamen und immer wieder auf ein Datenpad schauten. »Ich kenne Ihren Sohn nicht«, sagte ich dem Greis. Ich schüttelte seinen Arm ab und drehte mich um. Für einen Moment dachte ich an den Rim, wo man so sein konnte, wie man wollte. Und an den Diamanten, der so schön gefunkelt hatte im Licht der untergehenden Sonne.

Dann legten die Nichtmenschen mir Fesseln an. Die Sache mit Gregor war zwar verjährt. Aber irgendwie hatten sie Wind von ein paar krummen Dingern im Rim bekommen. Wer konnte denn wissen, dass die Gesetze von dort auch hier gelten? Hätte ich das geahnt, wäre ich bestimmt nicht zurückgekehrt. ◂

DER AUTOR

Axel Kruse veröffentlicht regelmäßig Geschichten im Sciencefiction-Magazin »Exodus« und der Sciencefiction-Heftreihe »ad astra«. Seine Kurzgeschichte »Seitwärts in die Zeit« wurde 2014 mit dem Deutschen Science Fiction Preis ausgezeichnet. Mittlerweile sind 14 Bücher aus seiner Feder erschienen.

Das Juliheft ist ab 22. 6. 2019 im Handel.

VORSCHAU



ANUSORN NAKDEE / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

RENAISSANCE DER GENTHERAPIE

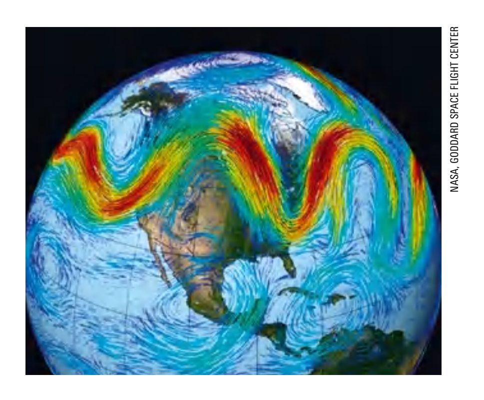
Nach einem tragischen Todesfall vor 20 Jahren war es still geworden um die Gentherapie. Doch sie hat Fortschritte gemacht, wird als Forschungsthema wieder interessant – und zieht die Aufmerksamkeit von Pharmafirmen auf sich. Die ersten gentherapeutischen Verfahren zur Anwendung am Menschen sind bereits zugelassen, weitere auf dem Weg dorthin. Ärzte möchten damit unter anderem erbliche Formen der Schwerhörigkeit behandeln.



EHT-KOLLABORATION

BILD EINES SCHWARZEN LOCHS

Astrophysiker haben erstmals die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Lochs fotografiert. Dafür mussten sie rund um den Globus verteilte Radioteleskope zusammenschließen. Ein Ergebnis für die Geschichtsbücher – aber lediglich das vorläufige Ende einer langen Reise.



NASA, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

BLOCKADEWETTER

Durch die globale Erwärmung wird der Jetstream schwächer. Das begünstigt extreme Wetterlagen. Dürren und Hitzesommer könnten ab Mitte des Jahrhunderts deutlich zunehmen.



HELMUTH SCHAM, MIT FRDL. GEN. DER STIFTUNG WELTERBE KLOSTERINSEL REICHENAU

VON MONTE CASSINO NACH BINGEN

Im Mittelalter oblag es Geistlichen, das medizinische Wissen der Antike zu bewahren und zu erweitern. Zu den wohl eigenwilligsten Vertretern dieser Heilkundigen gehörte Hildegard von Bingen.